

俯瞰ワークショップ

科学技術シーズを産業につなぐための先端計測 —日本の産業力強化に資する先端計測技術の諸課題— 報告書

平成20年3月



独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター
井上グループ

Center for Research and Development Strategy Japan Science and Technology Agency

Executive Summary

JST-CRDSの井上グループ・先端計測チームは平成16年度より活動を開始し、計測・分析の技術に関する基本俯瞰図の作成に続いて、2回の戦略ワークショップ（WS）「ものづくりおよび社会ニーズに関連する先端計測技術の方向性と開発戦略（2006年6月）」および「ものづくりにおけるハイスループット先端計測（2006年12月）」を開催し、戦略プログラム「ものづくりイノベーションのためのハイスループット先端計測（2007年5月）」を提案してきた。これらのWSでは、進行中の文部科学省科学技術・学術審議会技術・研究基盤部会知的基盤整備委員会先端計測分析技術・機器開発小委員会をベースとするJST先端計測分析技術・機器開発事業を、側面から支援する近未来の戦略提案を目的とした。

本ワークショップは、「科学技術シーズを産業につなぐための先端計測」と題し、計測分析に関する基礎研究の蓄積や科学的発見を、産業における計測ニーズの充足や革新につなげる基本因子を俯瞰することを目的に企画した。産業と計測の基本的関係を整理し、重点テーマの俯瞰・抽出を試みた。

世界の先端計測研究開発をリードするアメリカのNISTでも、計測は基礎科学のみならず産業の基盤であるとの視点に立って、産業を11分類して計測技術との関連について大規模調査を実施している。井上グループ・先端計測チームでは、本WSに先立って、NIST分類および経産省の産業連関表に基づく産業を、計測技術の基本俯瞰図に位置づけてみた。しかしこの方法は、既存の産業における計測課題抽出には役に立っても、イノベーション創出のカギとしての計測技術の俯瞰には不十分であると判断した。このため、外部有識者に基本俯瞰図を送付し、産業と計測をつなぐ新たな俯瞰への背景を説明し意見を求めた。さらに、CRDS内でのフェロー検討会および井上グループ内の諸会議においても十分に検討を行った。その意見や検討結果を集約し、以下の基本方針1) - 4)の下に、「産業進化（イノベーション）のために必要な計測・分析を探る」WSの企画を具体化した。

- 1) 産業基盤と競争力強化、シーズとニーズをつなげ進化の障壁を低減するための計測
- 2) 計測（Real Part）と情報（Imaginary Part）の組合せによるトータル技術の俯瞰
- 3) イノベーションへの動機、スピードを考慮した産業、計測の新たな分類
 - ・ 産業軸（基幹、先端、新） vs 計測軸（汎用、先端、未来）による実・時空間俯瞰
 - ・ 計測軸に関わる情報因子（計算機、検索、情報処理・操作、ネットワーク）と産業軸に関わる社会・経済・国際因子（安全規制、規格、標準）の先進情報技術による有機的結合と国際戦略
- 4) 科学シーズと産業ニーズをつなぐNonlinear、Disruptiveな大きな流れを俯瞰し、計測分析科学技術に求められる主要因子を掘り出してスムーズな連結の道を探る

上記の検討を経て、「科学技術シーズを産業につなぐための先端計測」と題するWSを

2008年1月12日に実施した。実際のプログラムの立案からWS進行に当たっては、産業界との接点に位置し、分析計測分野の著名な研究者でもある東レリサーチセンターの石田英之氏をコーディネーターに迎えた。WSは、基調講演、下記の4部について関連するテーマ発表と討論および総合討論で構成された。以下に、発表と討論を通して得られた要点、結論を記す。

○ 基調講演

「ものづくりは人づくりから」「道具は世界を変える」「イノベーションには計測障害の突破が必要」「つくってノーベル賞、使って世界一」「死の谷を越える」と言ったキャッチフレーズが端的に表すように、先端計測分析技術は産業にイノベーションを実現するためのキーテクノロジーである。本WSを通じて、さらに如何なる事をなすべきか、如何なる事ができるのか、を探っていく必要がある。

○ セッション1 基幹産業のニーズに寄与する汎用計測の革新的技術

建築・構造物／機械／電機／国家・安全保障／食料／化学などに代表される、国の経済の基盤を形成している産業では、製品の安定性・信頼性は高く、その確保と改善に既存の汎用計測が広く使われている。原料から製品に至る多元・複合的な計測へのニーズと課題を、透過電子顕微鏡、高速液体クロマトグラフィー、X線回折、核磁気共鳴、走査プローブ顕微鏡、質量分析について概観した。計測技術の進化をウオッチし活用すること、透過電子顕微鏡や走査プローブ顕微鏡などの微少領域を対象とした計測とマクロな構造観察や物性測定との橋渡し技術、高速液体クロマトグラフィー、エックス線回折、核磁気共鳴などにおける高速化、高分解能化と言った機器性能の向上に加えて、操作性やデータの扱いやすさと言ったソフトウェアの改良が、重要な俯瞰技術課題として挙げられた。

○ セッション2 先端産業のニーズに寄与する革新的計測・分析技術

IT／エレクトロニクス（半導体）／エネルギー・環境／バイオ・ヘルスケアなどに代表される、熾烈な国際競争にさらされている産業では、製品の改善／開発速度が速く、製造技術の改善余地が大いにある。キーとなる部材やプロセス技術の進化に関するロードマップが提示され、その早期達成による国際優位性の確保には既存の計測機器のみならず、絶えず計測の最先端技術にアンテナを張る一方、大学の研究者や機器メーカーの技術者との共同開発による新たな計測技術の開発が重要な課題である。競争の厳しい先端産業の強化・拡張の牽引力となる計測原理の実体化（プロトタイプ）の例を、新しい原理によるTHzテクノロジー、表面プラズモン利用分光、イオンビーム計測、3次元アトムプローブ、光熱分光、X線分光を例に探った。このような開発途上にある計測・分析機器においては、初期にユーザーに如何にアピールし使用させる事が出来るかが、カギであり、そのための支援が必要である。H20年度にスタートするJST先端計測分析技術・機器開発事業プロトタイプ改良開発プログラムは、その第1歩と評価できるが、メー

カーとユーザーのより広汎なクロストークによる効果的なシステム構築が望まれる。

○ セッション3 新産業の創出に寄与する未来計測・分析技術

ナノテク/新エネルギー・環境/ライフスタイル産業などに代表される、経済以上に地球環境、社会問題の解決をも想定した未来産業は、新しい科学シーズに基づく革新的な計測技術から生まれる可能性が高い。このような視点に立って、先駆性や国際戦略性の高い計測の課題を、ジョセフソンプラズマによるTHz波発振の理論と実験、超伝導人工原子・マイクロ波単-光子系の量子もつれ計測、ホトニッククリスタル(PC)の応用利用を例に探った。上記のような、未だ原理や機構の解明と言った段階にある技術を実現していくためには、基礎科学のシーズを積極的に探索し、育成を支援する国際的スキームが有効であろう。

○ セッション4 計測基盤技術の開発

データ処理・解析・認識までを含む計測知識の構造化・価値化を促進するための課題を、 μ ケミストリーと一分子計測、ものづくりとリンクした複合計測を例に探り、さらに、アメリカの計測情報技術の最前線、近接場光学顕微鏡、再生医療産業における計測ニーズについて、話題提供頂いた。我が国は、データ処理・解析・認識と言ったユーザーにとっての機器の使い易さを決める技術において、立ち後れていると言われており、この方面の強化は重要である。また、コンピュータやIT技術を駆使した高速度(ハイスループット)計測は、ハイスループット合成とともに産業競争力を高める重要な手段である。計測機器や計測法の国際標準化推進と並んで、今後我が国が一層真摯に取り組むべき分野であろう。同時に、再生医療といった、その基盤技術において我が国発の革新的技術が生まれた分野を如何に育てていくかという点に視点を置いた分析・計測法の検討も、重要である。

○ 総合ディスカッション

日本の企業における計測機器関連の企業規模や関連研究費の現状分析などの紹介のあと、計測シーズと産業間のギャップについて、計測機器産業マーケットの今後、シーズとニーズのマッチング、プロトタイプ実用化に向けた推進方策などについて、総合ディスカッションが行われた。

今後、我が国が、新しい真にイノベーティブな産業を興し、引き続いて世界の中での大きな存在感を保持してゆく為には、それを基盤として支える計測分析機器および関連技術のたゆまぬ進歩が必要である。その実現には、産官学が協力するとともに、それぞれが各々の分野において、本WSで提示された課題に真摯に取り組んでゆく事が望まれる。

目 次

1	ワークショップ概要	1
1.1	趣旨	1
1.2	目的	1
1.3	俯瞰マップ	2
1.4	産業・計測技術	3
1.5	開催概要	4
1.6	ワークショップ参加者	4
1.7	プログラム	6
2	セッション報告	7
2.1	流れ	7
2.2	基調講演	8
2.3	セッション1 基幹産業のニーズに寄与する汎用計測の革新的技術	11
2.4	セッション2 先端産業のニーズに寄与する革新的計測・分析技術	23
2.5	セッション3 新産業の創出に寄与する未来計測・分析技術	37
2.6	セッション4 計測基盤技術の開発	44
2.7	総合ディスカッション	52
Appendix		
1	事前アンケート	60
2	事後アンケート	68
3	講演資料	72

1 ワークショップ概要

1.1 趣旨

独立行政法人科学技術振興機構（JST）研究開発戦略センター（CRDS）は、科学技術の研究分野を俯瞰的に展望し、今後重要となる研究領域、課題を系統的に抽出し、社会ニーズの充足と社会ビジョンの実現に向けた研究開発のファンディング戦略を立案・提言している。その活動の一環として、重要研究テーマについて専門家によるワークショップを開催している。

1981年にビニヒとローラーによって発明された走査トンネル顕微鏡およびその応用である種々の計測手法が、半導体微細加工を中心とするナノテクノロジーをベースとする産業に飛躍的な進歩をもたらした。これが端的に示すように、産業イノベーションは、革新的計測技術の登場によってもたらされることが多い。また、先日発表された米国標準局（NIST）のレポートにおいては「計測技術の革新なくして産業イノベーションは生まれ得ない」と述べられている。JST/CRDSでは、このように、産業技術の重要な要素であると同時に、科学技術の基盤でもある計測・分析技術全般について、国が育成強化すべき研究開発課題とその推進方法を提案するために、各産業からの計測・分析機器へのニーズや計測・分析技術のシーズを俯瞰してきた。

最近幾分持ち直したという見方もあるものの、世界の中で日本の産業競争力は、80年代に見られた圧倒的な競争力を失ってしまっている。これに歩調を合わせるように、日本の計測機器の競争力も一時の隆盛を失って久しいと言われている。昨年度、CRDSでは、この現状を打破し、日本の産業力を強化し、イノベーションを誘発するには、重要な計測機器の高速化、高効率化の達成、つまり計測技術の『ハイスループット化』が必要不可欠であることを訴えた。幸い、この考え方は、政府各機関などにも浸透してきた。

そこで本ワークショップでは、5年～10年先を見据えて「科学技術シーズを産業につなぐための先端計測」を実現し、真に産業イノベーションを誘発する事を目指した研究開発戦略を推進するため、そのベースとなる俯瞰マップを拡充することを目的として、(1)基盤産業の強化・差別化をもたらす計測技術改革の課題、(2)競争の厳しい先端産業の強化・拡張の牽引力となる計測原理の実体化（プロトタイプ）に関する課題、(3)先駆性・国際戦略性の高い計測—全く新しい産業分野を生む可能性を有する領域への先行投資（萌芽的課題）、の3つの課題と3者に共通する情報基盤としての、(4)計測データの処理・活用システム（インフォマティクス）の構築について検討する。

1.2 目的

本ワークショップの目的は、5年～10年先を見据えて「科学技術シーズを産業につなぐための先端計測」を実現し、真に産業イノベーションを誘発する事を目指した研

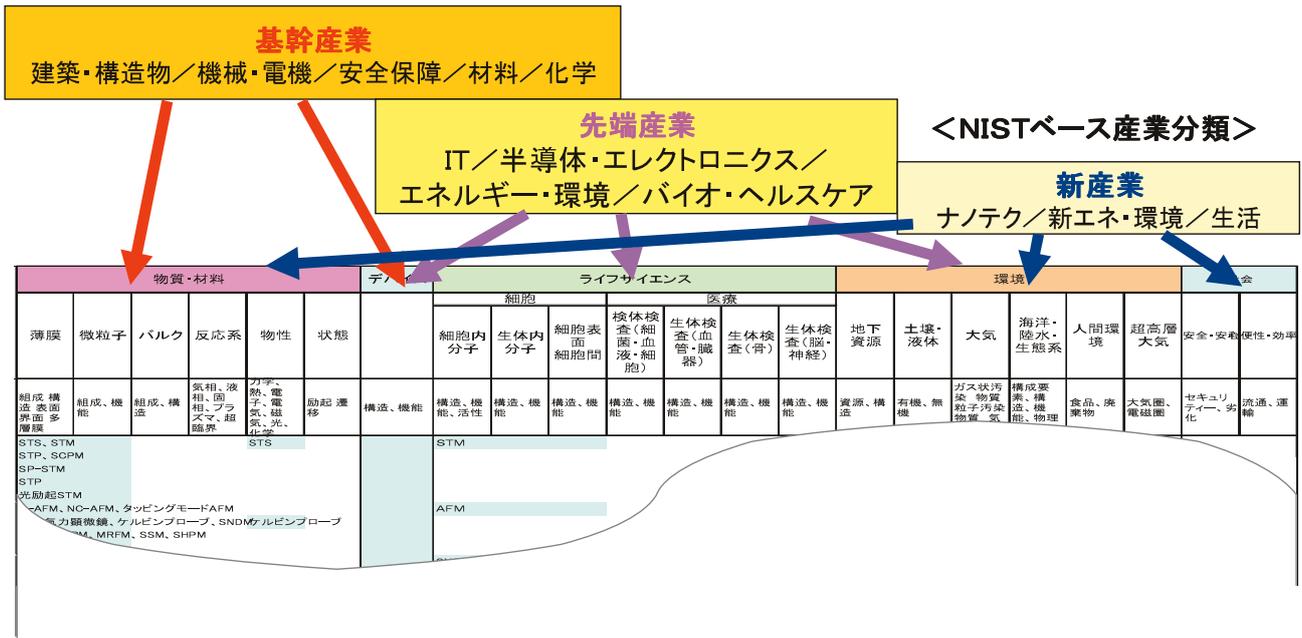


図2 俯瞰マップ：産業との主要な対応

1.4 ワークショップにおける産業・計測分野分類について

本ワークショップでは、産業連関表およびNISTの分類を参考に、産業・計測分野を便宜上、以下のように分類した。

●産業分野

【新産業】 ナノテク／新エネルギー・環境／ライフスタイル産業などに代表される、今後新しい科学シーズや計測技術から生まれる可能性がある萌芽的産業／経済的成熟社会において伸びる可能性がある産業

【先端産業】 IT／エレクトロニクス（半導体）／エネルギー・環境／バイオ・ヘルスケアなどに代表される、激しい国際競争にさらされ、製品の改善／開発速度が速く、製造プロセスの改善余地が大いにある産業

【基幹産業】 建築・構造物／機械（・電機）／国家・安全保障／食料／化学などに代表される、国の持続的発展に肝要で、製品の改善、開発を安定的に進めるため、プロセスの改善余地がある産業

●計測分野

【汎用計測技術】 産業製品（商用）レベル

【先端計測技術】 開発～展示・プロトタイプレベル

【未来科学技術】 科学シーズ（発明、発見、可能性予言）レベル

1.5 開催概要

日時：平成20年1月12日(土) 10:15~18:00

場所：JST・社会技術研究開発センター会議室

コーディネータ：石田 英之 (株)東レリサーチセンター 代表取締役 副社長

1.6 ワークショップ参加者

(敬称略, カゴリ別五十音順)

カテゴリ	氏名	所属・役職
基調講演 講演者	二瓶 好正	東京理科大学総合研究機構長
	伊藤 正人	(株)日立ハイテクノロジーズナノテクノロジー製品事業本部 主任技師
	河合 潤	京都大学大学院工学研究科 教授
	河田 聡	大阪大学大学院工学研究科 教授
	木村 健二	京都大学大学院工学研究科 教授
	斎木 敏治	慶應義塾大学大学院理工学研究科 准教授
	杉山 昌章	新日本製鐵(株) 技術開発本部先端技術研究所 主幹研究員
	仙場 浩一	日本電信電話株式会社物性科学基礎研究所 グループリーダー
	竹内 一郎	JST/CRDS (計測・産業技術G)特任フェロー/メリーランド大学准教授
	立木 昌	東京大学大学院新領域創成科学研究科 客員研究員
	豊田 岐聡	大阪大学大学院理学研究科 准教授
	馬場 俊彦	横浜国立大学工学研究院 教授
	原田 仁平	(株)リガク 顧問
	宝野 和博	(独)物質・材料研究機構磁性材料センター センター長
	本河 光博	JSTプログラムオフィサー
	森田 清三	大阪大学大学院工学研究科 教授
	安岡 義純	福井大学遠赤外領域開発研究センター 客員教授
	石井 哲也	JST/CRDS アソシエートフェロー
	コメンテータ他	奥居 徳昌
黒田 孝二		大日本印刷株式会社生産総合研究所 主席研究員
長我部 信行		(株)日立製作所 基礎研究所 所長
高木 誠		JSTプログラムオフィサー/福岡女子大学長
田中 耕一		(株)島津製作所質量分析研究所 所長
知京 豊裕		(独)物質・材料研究機構半導体材料センター センター長
濱口 宏夫		東京大学大学院理学系研究科 教授
古沢 一雄		(株)島津製作所田中耕一記念質量分析研究所
森川 智		ヤマト科学株式会社代表取締役社長
森島 績		JSTさきがけ「生命現象と計測分析」研究総括
オーガナイザー		
コーディネータ	石田 英之	(株)東レリサーチセンター 代表取締役副社長
座長 (S 1)	小島 建治	JST/CRDS (計測・産業技術G) 特任フェロー/日本電子(株)副理事
座長 (S 2)	北森 武彦	JST/CRDS (計測・産業技術G) 特任フェロー/東京大学 教授
座長 (S 3)	澤田 嗣郎	JSTプログラムオフィサー
座長 (S 4)	長谷川 哲也	JST/CRDS (計測・産業技術G) 特任フェロー/東京大学 教授

座長 (S 5)	志水 隆一	(財)国際高等研究所 上級研究員
座長 (S 5)	鯉沼 秀臣	JST/CRDS (計測・産業技術G) シニアフェロー
JST	生駒 俊明	JST/CRDS センター長
	有本 建男	JST/社会技術研究開発センター長 / CRDS副センター長
	井上 孝太郎	JST/CRDS (計測・産業技術G) 上席フェロー
	安藤 健	JST/CRDS (計測・産業技術G) シニアフェロー
	大木 義路	JST/CRDS (計測・産業技術G) シニアフェロー
	久保内 昌敏	JST/CRDS (計測・産業技術G) フェロー
	大川 令	JST/CRDS (計測・産業技術G) フェロー
	東 美貴子	JST/CRDS (計測・産業技術G) アソシエートフェロー
	嶋林 ゆう子	JST/CRDS (計測・産業技術G) アソシエートフェロー
	石原 聡	JST/CRDS (ナノテク・材料G) シニアフェロー
	相馬 融	JST先端計測技術推進部 部長
	古屋 美和	JST先端計測技術推進部 主査
	速水 昇	JST先端計測技術推進部 主任調査員
	真造 謹爾	JST先端計測技術推進部 主任調査員
	我妻 雅子	JST基礎研究制度評価タスクフォース メンバー
政府・政府 関係	都筑 秀典	文部科学省研究開発局研究環境・産業連携課新技術革新室 科学 技術・学術行政調査員
	大江 朋久	経済産業省製造産業局非鉄金属課 ナノテクノロジー・材料戦略室 技術係長
	岩下 徹幸	NEDO ナノテクノロジー材料技術開発部

1.7 プログラム

10:15-10:20 挨拶 (井上孝太郎, 石田英之)

10:20-10:30 趣旨説明 (鯉沼秀臣)

10:30-10:40 基調講演 (二瓶好正)

10:40-12:20 セッション1 基幹産業のニーズに寄与する汎用計測の革新的技術

(座長: 小島建治)

- (1) 10:40-10:55 電子顕微鏡 (杉山昌章)
- (2) 10:55-11:10 高速液体クロマトグラフィー (伊藤正人)
- (3) 11:10-11:25 XRD (原田仁平)
- (4) 11:25-11:40 核磁気共鳴 (本河光博)
- (5) 11:40-11:55 SPM (森田清三)
- (6) 11:55-12:10 質量分析装置 (豊田岐聡)
- (7) 12:10-12:20 ディスカッション

12:20-13:10 昼食

13:10-14:50 セッション2 先端産業のニーズに寄与する革新的計測・分析技術

(座長: 北森武彦)

- ① 13:10-13:25 新しい原理によるTHzテクノロジー (安岡義純)
- ② 13:25-13:40 表面プラズモン利用分光 (河田聡)
- ③ 13:40-13:55 イオンビーム計測 (木村健二)
- ④ 13:55-14:10 3次元アトムプローブ (宝野和博)
- ⑤ 14:10-14:25 光熱分光 (澤田嗣郎)
- ⑥ 14:25-14:40 X線分光 (河合潤)
- ⑦ 14:40-14:50 ディスカッション

14:50-15:00 コーヒーブレイク

15:00-15:55 セッション3 新産業の創出に寄与する未来計測・分析技術

(座長: 澤田 嗣郎)

- ① 15:00-15:15 ジョセフソンプラズマによるTHz波発振の理論と実験 (立木昌)
- ② 15:15-15:30 超伝導人工原子・マイクロ波単-光子系の量子もつれ計測 (仙場浩一)
- ③ 15:30-15:45 ホトニッククリスタル (PC) の応用利用 (馬場俊彦)
- ④ 15:45-15:55 ディスカッション

15:55 -16:50 セッション4 計測基盤技術の開発

(座長: 長谷川哲也)

- ① 15:55-16:10 μ ケミストリーと一分子計測 (北森武彦)
- ② 16:10-16:25 ものづくりとリンクした複合計測 (竹内一郎)
- ③ 16:25-16:35 アメリカの計測情報技術の最前線 (竹内一郎)
- ④ 16:35 -16:50 話題提供 (斉木敏治, 石井哲也)・ディスカッション

16:50-17:05 総合ディスカッション・イントロダクション (石田 英之)

17:05-18:00 総合ディスカッション

(座長: 鯉沼秀臣、志水隆一)

18:00 終了

2. セッション概要

2.1 進め方

JST/CRDS 鯉沼秀臣

各セッションは、以下の視点で進める。

【講演】 専門領域の技術俯瞰と今後取り組むべき研究開発課題の提案

【ディスカッション】 各セッションのテーマについて、各講演で提案された研究開発課題以外の汎用計測／革新計測／未来計測技術課題の洗い出しおよび俯瞰マトリクスシート（図3）への記入

●セッション1. 基幹産業のニーズに寄与する汎用計測改革技術

【テーマ】 既存産業の強化・差別化をもたらす計測技術の課題とは

●セッション2. 先端産業のニーズに寄与する革新的計測・分析技術

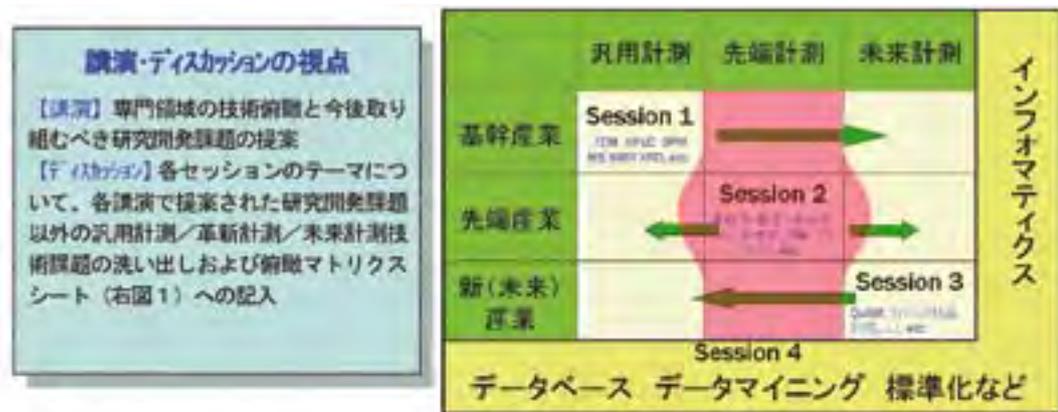
【テーマ】 競争の厳しい先端産業の強化・拡張の牽引力となる計測原理の実体化（プロトタイプ）に関する課題とは

●セッション3. 新産業の創出に寄与する未来計測・分析技術

【テーマ】 先駆性・国際戦略性の高い計測－全く新しい産業分野を生む可能性を有する領域への先行投資／萌芽的課題とは

●セッション4. 計測基盤技術の開発（データ処理・解析・認識までを含む）

【テーマ】 計測知識の構造化・価値化を促進するための課題とは



先端計測欄下のワインカラー部は、現行の先端機器開発事業が主としてカバーしている領域。

図3 俯瞰マトリクスシート

●総合ディスカッション 「科学シーズを産業につなぐための先端計測－日本の産業力強化に資する先端計測技術の諸課題」とは

- ・コーディネータによる“日本の産業力強化に資する先端計測技術の諸課題とは”に係る、参加者全員のマインドセットを促す問題提起
- ・図3の俯瞰マトリクスシートを眺めつつ、今後、取り組むべき研究開発課題の方向性を議論

2.2 基調講演

イノベーション創出のための先端分析機器開発

東京理科大学 二瓶好正

はじめに、我が国におけるものづくりの文化、技術の伝承と人材育成の伝統を象徴する話題をご紹介します。トヨタ自動車株式会社の豊田章一郎さん（現名誉会長）が、外国の要人を伊勢神宮に案内されたところ大変感激して帰られたという話が、最近の学士会会報に掲載されています。私も伊勢神宮に参拝した折、式年遷宮の現場を見せていただいて感激いたしました。1300年以上にわたって、20年に1回ずつ神殿の造営をする。なぜ20年に1回なのか、なぜまだ100年、200年もつものをわざわざ建て直すのか。まさにこれは技術の継承のための行事であると思います。信長の戦国時代だけ2、3回欠けておりますが、それ以外はきちんと行われています。これは大変なことだと思いますが、我が国のものづくり文化の、一つのシンボルだと思います。要するに、実際に物をつくる行為を共有しないと技術が伝承できません。しかも伝承する主体は人ですから、いかに人をつくるか、すなわちものづくりによる人づくりが行われているわけです。大学においても、「とにかく君がこれをつくってみろ」と学生にはっぱをかけます。学生はゼロから始め、やっているうちにだんだん夢中になって色々なことを学んでいきます。これこそ発見的プロセスといいますか、それそのものが人づくりの一番大事なプロセスです。すなわち人づくりはものづくりからということになります。つまり、伊勢神宮の式年遷宮は我が国のものづくり文化の象徴であると共に、人づくり文化の象徴でもあるのです。

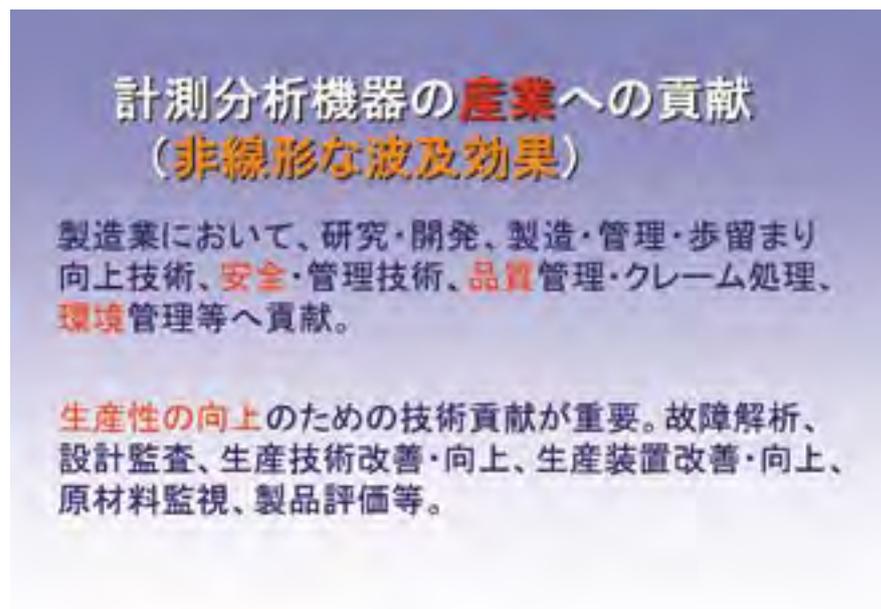


図 4

さて、計測分析機器に関する話題ですが、JSTの先端計測事業は、開始から今年で5年目の正念場です。道具が世界を変える。これは量子的飛躍、クワンタム・リープの意味ですが、物をはかるということが如何に世界を変えてきたか。マザーツールに倣ってマザーインスツルメントと呼びますが、「物をはかる、分析する装置」が極めて大きな波及効果をもたらすものであると主張することにより、事業を開始して頂いたという経緯があります。また、言わずもがなですが、計測分析機器が産業に如何に貢献するか、極めて多様です。これは結局、ネズミ算的に効果が拡大するという意味で、非線形な波及効果をもたらす典型例ではないかということをも主張したいと思います。

本日、主にご紹介したいポイントの一つは、アメリカの「米国競争力イニシアチブ」です。これは、科学と産業を結ぶ計量技術はイノベーションの要であるという認識のもとに、DOE、NSFと並んでNISTを重点機関として、大幅なてこ入れを図るということを決めたもので、本質をとらえていると思います。その背景には、結局、米国のイノベーション戦略の一翼に、計測分析技術・機器開発を主軸として強力に展開するという考え方があるということをも強調したいと思います。

また、昨年、NISTを中心としたアメリカの国家計量システムの全体像に関するアセスメントレポート（11の産業・技術分野の計測技術に対するニーズ調査）が出ています。詳細は省略しますが、計測障害（メジャーメントバリア）という言葉を使い、産業・技術分野別に、計測技術の遅れが障害になって技術進歩が妨げられているという認識のもとに、それをどうやれば突破できるか、それを突破すれば、確実により大きなイノベーションを誘起できるだろうという考え方です。

レポートでは、イノベーションを加速するための戦略として7つの提言がまとめられています。①計測ニーズの社会的認知度を向上すること。要するにもっとアクセルを踏む、力を入れないといけない。②計測課題を解決する能力を有するグループ・研究者を束ねて連携をする。③計測技術のブレークスルーを促進する新しい「協創」。クリエイティブに協力をするという意味です。④計測ニーズに優先順位をつける。⑤産業界の具体的計測課題の解決を支援する。⑥産学共通の計測ニーズを分析し、「相乗効果」を活用する。「相乗効果」というキーワードが重要です。一つの分野で役に立つことは、他の分野でも役に立ちます。一つの技術がリニアに効果を上げるのではなく、まさにノンリニアに効果を発揮するという可能性を秘めているということです。⑦計測技術の商業化の促進。もちろん、こうしなければ本当のイノベーションにつながらないわけです。レポートはこのような形でまとめられていますが、私どもが考えてもほぼ同じ結論になるだろうと思います。それから、アメリカの目指すべき方向として、計測インフラを構築し、産学官の協力を図り、国際協調を進める。これも当然ですが、アメリカ流のやり方で、世界を巻き込んで進めるということです。

これらをまとめると、①アメリカは計測分析技術を国際競争力強化戦略の中核に据えた。②計測分析技術はイノベーション実現のためのキーテクノロジーになる。③非

常に具体的な目標、戦略を立てつつある。④NISTの予算を10年間で倍増しようという計画を決めた。こういった内容になります。

さて、我が国の先端計測分析技術・機器開発事業の現状を紹介します。

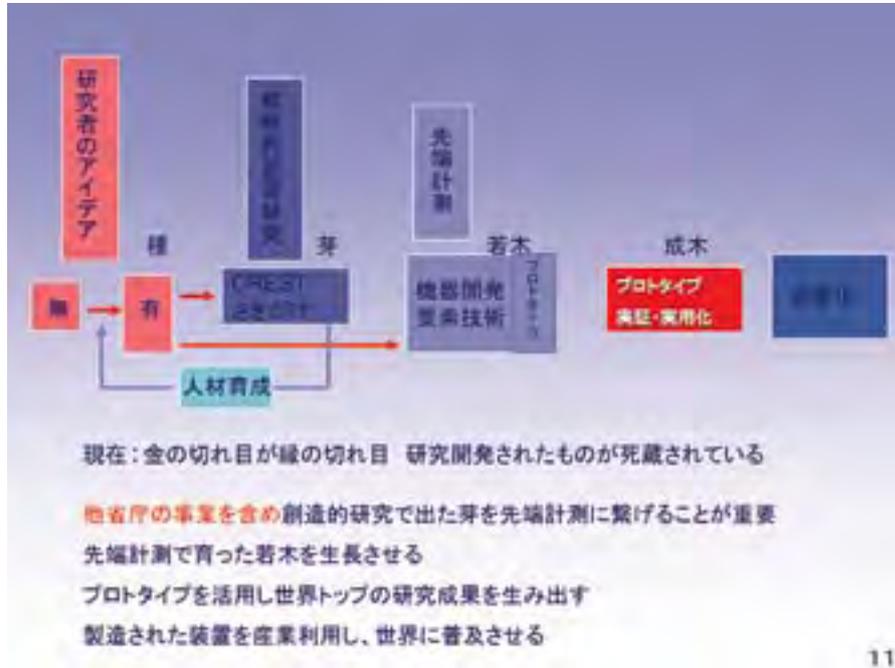


図 5

JSTの先端計測事業は、平成20年度に55億円の予算規模となります。総合科学技術会議のヒアリングで、加速すべき事業ということで150件程の課題の中から10件程度に絞られた中の一つに選ばれました。この事業は、オンリーワン、ナンバーワンを目指してスタートしましたが、昨年からのものづくりイノベーションの項目を追加しました。来年度は更に、プロトタイプ機の「実証・実用化」をプログラムとして組み込み、さらに充実した成果を目指すことを考えています。大事なことは、この新しいプログラムは、他省庁の事業も含め、創造的研究により生み出された装置化研究の芽を更に発展させようとするものであり、従来にない新しい事業です。

お正月の新聞記事などにも色々ありましたが、日本の経済はだんだん地盤沈下している。30年も経つと、日本のGNPは世界のパーセント以下になるというショッキングな数字もあります。うかうかしていると本当に現実となってしまうと思いますが、それに対してどのように対処するかが、正に今日の議論のポイントです。要するに、計測・分析研究でも、波及効果の高い分野を重視した政策をとる必要があるだろうということが申し上げたいことです。それから計測障害という言葉をやはり使わざるを得ない。人材育成プログラムも必要です。ものづくり力の強化、これももっと戦略を練らなければいけないと思います。

最後にまとめますと、ものづくりは人づくりから。道具は世界を変える。イノベーショ

ンには計測障害の突破が必要である。さらに先端計測のキャッチフレーズの一つであります。創ってノーベル賞、使って世界一。死の谷を越える。このような大きな波及効果をもたらす基盤分野にもっと重点投資をしなければいけない、というような主張をしたいと考えております。

2.3 セッション1 基幹産業のニーズに寄与する汎用計測の革新的技術

S1-1 透過電子顕微鏡 (TEM)

新日本製鐵 杉山昌章

基幹産業掛ける汎用技術、とくに透過電子顕微鏡 (TEM) との掛け合わせで、鉄鋼で何ができるかという紹介をさせて頂く。鉄鋼材料開発は強度軸で考えれば一番簡単で、強度を上げていくことで軽量化に対応するが、同時に材料組織制御はますます複雑になっていく。

鉄鋼材料開発においては、組織を見るということは非常に大切である。見るとはどういうことかと言うと、例えば、明石大橋の1本に見える太いケーブルは、ストランドと呼ばれるたくさんのケーブルワイヤの集合体である。そのワイヤー本の中を透過電子顕微鏡で見ると、高強度のピアノ線と同じパーライト組織、すなわち、セメンタイトとフェライトが交互に層状に並んだ組織になっている。炭素繊維と同じように、層状組織であるから、長さ方向には強い。さらに、その界面を電子顕微鏡で元素分析するとすぐわかるが、界面にシリコンが濃化されている。というのは、海の上で使われるのでメッキするが、このために最終工程段階で約450℃に温度を上げる。その際、セメンタイトの部分が球状化を起し、ピアノ線の構造が壊れてしまう。この時、炭素より拡散の遅いシリコンが濃化していると、そのセメンタイトの球状化が抑制される。このあたりは、材料知識と経験から組織を造り込んだことになる。今後の橋梁用に開発されるケーブルワイヤはさらに高強度化が要望されるが、そのためには、次はこのシリコンと炭素の結合がどうなっているかというところに踏み込み次のアイデアを生み出さないといけない。このような形で、橋梁用ケーブルワイヤのような大型構造部材においても4000メートルにわたってずっと原子レベルの材料組織制御が行われているという点は、見事である。

透過電子顕微鏡が鉄鋼業においてどういう価値があるかについてさらに考えてみたい。鉄も、ほかの金属材料も、成分設計が行われる。鉄鋼には、カーボン、マンガン、シリコン、さらにはチタンとかニッケルといった微量元素を添加していく。それらを造り込みの段階で組織制御する。その結果として鋼中に生じる析出物や粒界などへの偏析をコントロールして、最終的に強い鉄、靱性の高い鉄を作り込んでいく。電子顕微鏡の役割というのは、先ほどの例のように、見ることによって事実がわかってくる。鉄の場合には原子レベルの知見が出てくると、合金元素の役割というものがわかってくる。これが新しいプロセス改善につながり、特許につながると考えてよいだろう。

もう一つは、見るだけではなく、実際の現象、つまり、どうして析出するのか、なぜ偏析するのかを解明する。物性的な研究をしていくと、その原理がわかってくる。そうすると、例えばこれほどニッケルを使わなくていいのではないかということに発展する。というのは、鉄は大体1トン当たり数万円であるが、その中のニッケルを0.1%だけ増やしただけでもトン当たり数千円も高くなってしまう。微量元素をどう減らすかは非常に重要であるが、ただ、それを経験と統計だけでやるのでは無理で、やはり現象を解明し、「それならばこの元素はやめた方がいいのではないか？」というふうにならざるを得ない。この見ることと原理原則の追求の二つの軸が電子顕微鏡の役割だと考えている。

では現在の電子顕微鏡能力の限界からみるとどうであろうか。一例として、自動車用鋼板表面を塗装したときに、鉄の中の炭素が動き、転位のところに炭素が固着することによって硬くなる塗装焼付け鋼板を挙げる。現在の電子顕微鏡だと、転位芯の所に集まるカーボン等の元素はなかなか見えない。それはアトムプローブを使うと見えるが、電子顕微鏡はここまで来ていない。ただし、昨今の収差補正電子顕微鏡の技術がそこに近づいてきている。転位組織の中で、そこに固着される種々の元素分布が見えてきたら、転位は強化機構の源であるだけにまた新しいアイデアが生まれるであろう。この視点以外にも、車に使われる鉄はますます高強度化して、新しいハイテン化の時代に入ってきている。ところが高強度化すると加工しにくくなる。そこで、どうすれば加工しやすくなるかが技術課題になり、転位の動きに対する基礎的研究が注目される。

材料組織を見ながらの微視的な変化の定量解析は、電子顕微鏡の独断場である。車だけでなく厚鋼板においても同様であり、橋梁とか鉄筋、水道とか建築構造物とかさまざまな社会資本をどんどんこれから更新しなければいけない。それらの鋼材開発には、耐久性、疲労や腐食、安全性、メンテナンスのために、これまで合金添加元素を多く入れて強度を上げてきた。ところが、先ほど話したように、例えばニッケルを0.1%増やすだけでも非常に高価になる。合金元素を増やさずに強度を上げるためには、転位や粒界などの格子欠陥についての基礎学術までさかのぼらないと、新しい設計はできないと考えられている。そのときに電子顕微鏡の果たす役割というのはかなり大きい。

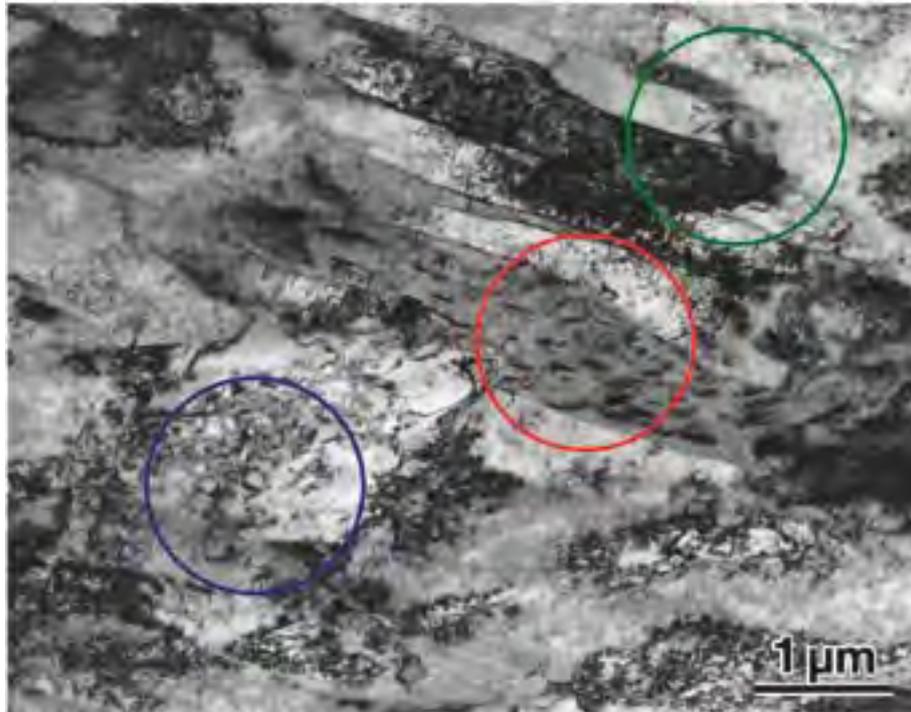


図6 ハイテン鋼材の微細組織を示す透過電子顕微鏡写真

複雑な組織で定量化したい転位や析出物が分散している実際の電子顕微鏡写真を図6に示す。このような複雑な組織に対峙した時に、現状の透過電子顕微鏡技術ではなかなか実用鋼開発レベルで十分とはいえない。いかに組織と現象を定量的にモデル化していくかということが鍵になっており、その点で現在の電子顕微鏡は不十分であり、環境計測やその場観察などの機能の複合化も期待されている。また収差補正技術ができて電子線がより絞れるようになり、原子レベルの計測ができたとしても、分析に利用される特性エックス線は弱く、結果として微量元素に対する分析感度は低くなってしまう。もちろん元素によってさまざまではあるが、この現状の元素分析感度が一桁上がるだけでも鉄鋼の材料設計が大きく変わる可能性がある。そういった分析感度という軸でも電子顕微鏡を考えてほしい。さらには、最先端の透過電子顕微鏡を企業で持ち活用するためには、振動や塩害といった設置環境に対する耐性向上も重要である。また、鉄は磁性材料であるので、電子顕微鏡の中の強い磁場で試料が曲がってしまい、トモグラフィ法などの3次元像可視化技術の適用にはそのままでは課題が残る。つまり、材料ごとにどういう顕微鏡が必要か、どういう試料周りの技術が必要なのかといった、産業のニーズと作る側のニーズを把握して初めて新しい電子顕微鏡ができてくるのではないかと思っている。

まとめると、電子顕微鏡プラスアルファ、環境TEMでも、引っ張り試験TEMでも良いが、いろいろな意味でプラスアルファのついた新しい電子顕微鏡、さらに定量的な計測装置としての電子顕微鏡が必要と思われる。

S1-2 高速液体クロマトグラフィー (HPLC)

日立ハイテクノロジーズ 伊藤正人

液体クロマトグラフィーは成熟した計測技術であり、カラムを用い液体中の成分を定量する技術として、ライフサイエンスから食品材料、環境分析といったところで広く用いられている。1970年に、充填剤が強化され、いわゆるHPLC、高速液体クロマトグラフィーという方法ができ上がり、分析時間でおよそ数十分程度の分析ができるようになって広く普及された。2004年には、米国のウオーター社のUPLC、ウルトラ・パフォーマンス・リキッド・クロマトグラフィーにより、1分間を切るくらいの時間で分析ができるということで、また革新的な状況に入っている。



図7

図7に最近の研究開発テーマを示すが、高速化・高分離化のために高圧化、高温化も手法として行われているし、モノリスカラムという粒子を使わない一体型も、マイクロ化も、電気泳動力を用いた液体クロマトグラフィーも、剪断力を使ったクロマトグラフィーも研究されている。また、分析化学用の、特異性とか選択性といったサンプルの溶出に基づいた特性で分離するクロマトグラフィーも数多く研究されている。

まず、高速化、あるいは高分離化を歴史的に振り返ってみると、15年くらいで1けたずつ速くなってきている。粒子の直径を一つのパラメーターとすると、40マイクロメートルから、20、10、5マイクロメートルとなり、今は2マイクロメートルが主流と微細化されている。また、検出器のフローセルも、10マイクロメートルから1マイクロメートルとなり、最近はそれを切るくらいの体積になっており、これが高速化の一つの大きなキーになる技術と考えられる。

さらに、現在は圧力を上げたり、温度を上げたりということで高速化されているが、この方法で行き詰まってくる可能性もあるので、本日はその辺の革新的な手法について探ってみた。高圧化による高速化の代表例としては、圧力は500気圧とした例がある。最近では粒子ではなく、もう少し液体の流れのよいモノリスカラムというものが研究されており、これでさらに3倍くらいの高速化が図れるだろうと予測されている。また、先程述べたように、流量が1マイクロリッター、あるいはそれ以下のサブマイクロリッターの領域に入っているが、従来技術ではなかなかその体積が実現できない。そこで、シリコンウエハーをエッチングしたマイクロチップを用いて、粒子を用いずに分離する研究が行われている。さらに、図8に示すように、直径200ナノメートルのシリカのコロイドで出来た多数のビーズをシリコンウエハーの溝の中に埋め込んで分析するということが研究されており、現状のHCLCよりも1桁くらい短い時間でクロマトグラムが得られている。

今まで話したのは主に圧力を駆動原理としているが、圧力を用いるとポンプが制限になるので、電気浸透流を用いた方法も古くから研究されている。ただし、中の液体電解質が変動するとピーク出現時間が変動するので、商用化まで往っていないという技術だが、高速・高分離化には有用な方法になってくると考えられる。



図8

もう一つの駆動方式として考えられている剪断力駆動は、シリコンウエハー上の溝の液体をこすると、剪断力で引っ張り込まれて液体が移動するという原理である。この剪断力による液体の移動に伴って、液体の上に固定されたサンプルも分離展開される。この方式により、1けた、2けた高速化できる可能性があると示唆されている。

物理的に保持時間を速くするのではなく、化学的にも速くすることができる逆相クロマトグラフィーも研究していく必要がある。

まとめとして、HPLCの高速・高分離化を目指して、現在広く用いられている圧力駆動から、電気的な駆動や剪断力駆動の可能性も出てきており、マイクロチップ化も確実な技術動向となっていくものと考えられる。

S1-3 エックス線回折 (XRD)

(株) リガク 原田仁平

XRD、すなわちエックス線回折はエックス線を結晶に当てて得られる回折像から試料結晶の質を評価したり、結晶の原子構造を調べる分析法である。図9にもとづき要素技術を挙げると、大まかに分けて4つある。まずエックス線源+光学系がある。次に、試料結晶の方位を決めるための測角技術（ゴニオメトリー）が必要である。そしてエックス線を検出する検出器（フィルムや2次元の検出器など）の要素技術がある。最後にデータを自動的に収集し、素早く解析するソフトウェアの技術が優れていなければならない。加えて、最近では結晶の良否を素早くスクリーニングするハイスループット化技術として、ロボットを導入する技術も盛んになっている。

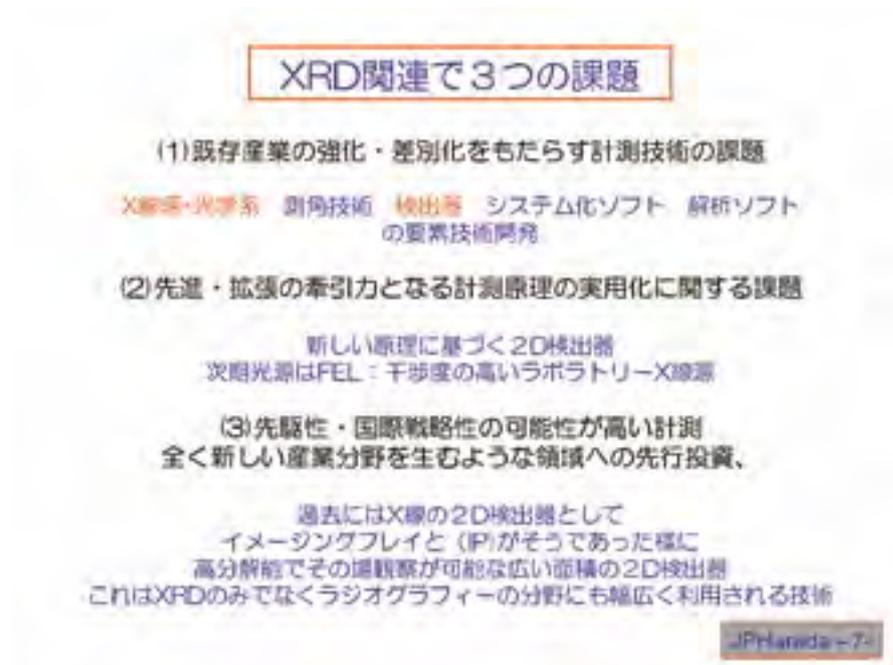


図9

タンパクの構造解析用に(株)リガクが開発したエックス線回折装置の一例を図5に示す。普通のX線管球に比べて大体6倍以上の強度を持つ回転体陰極型のX線発生装置が用いられ、ポストゲノム、タンパク5000(米)とか3000(日本)とかのプロジェクトに何とか対応出来た。しかし、ナノテクノロジーで用いられる試料の評価を含め

次の課題としては、新しい原理に基づいた、その場観察が可能な（好感度な）広い面積の2次元検出器が必要となる。これが出来ると、ラジオグラフィー、例えば胸とか胃のエックス線写真をフィルムに代わり用いることもでき、撮影時間を減らせるだろう。もう一つ、干渉度の高いエックス線が求められている。国家的なプロジェクトとして、FEL計画があるが、実験室レベルで、干渉度の高いエックス線源もやはり必要となるであろう。さらにグローバル化に対応する分析機器開発は国内に留まらず国外で開発された要素技術にも目を向ける必要がある。

S1-4 核磁気共鳴 (NMR)

JSTプログラムオフィサー 本河光博

核磁気共鳴NMRが対象としているのは、図10に示すように、原子核に付随する核磁気モーメントである。実際に用いられているのは、主として、水素の原子核（プロトン）とたんぱく質の構造解析などに使われている窒素と炭素の3種類の原子核である。その共鳴振動する電磁波の周波数は磁場に比例し、プロトンの場合は1テスラの磁場で42.6メガヘルツとなっている。共鳴周波数が高いほど分解能が上がるのだが、周波数が高いということは高い磁場が必要となる。現在では、ブルカーとかオクスフォードが共鳴周波数950メガヘルツで、磁場は22.3テラヘルツくらいの装置を出している。

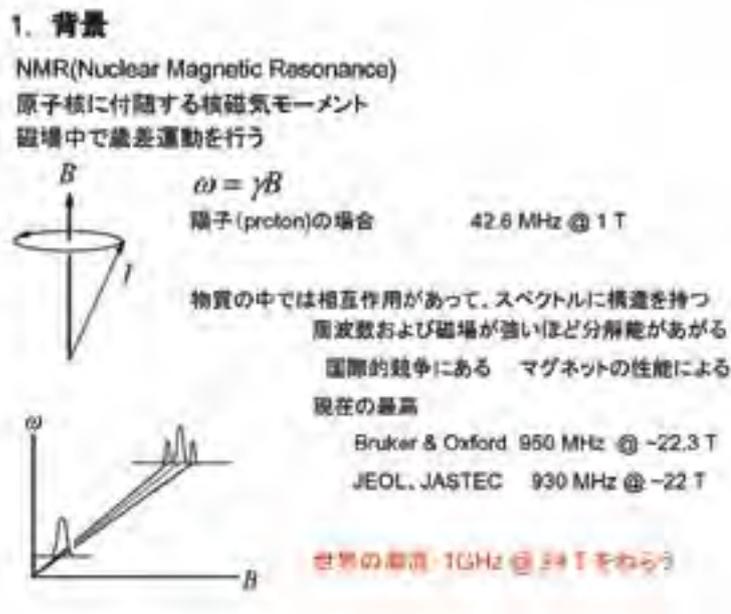


図10

日本では日本電子とJASTECの装置が930メガヘルツである。日本国内のシェアでは、ブルカーが40%、バリアンが10%、日本電子は50%で一応健闘しているが、世界のシェアになると日本電子は10%しかないというのが現状のようである。世界の潮流としては、各社が1ギガヘルツをねらっている。1ギガヘルツだと23.6テスラなので、24テ

スラをねらっていることになる。ところが、20テスラを超えると、超電導磁石に非常に大きな問題が生じる。従来の超伝導ワイヤを使ったマグネットでは、約22テスラが限度である。

マグネット線材としては、日本の線材は定評がある。また、マグネットの技術的なことは、ラムダチップを使って、液体ヘリウムを超流動に持って行って初めて実現する2.2 Kではなく、4.2 Kで運転できる装置を開発している日本の技術はすぐれている。ところが、なかなか売れない。戦略に負けている。JSTの先端計測分析技術・機器開発事業では、世界の潮流である1ギガヘルツへの挑戦と超高感度への挑戦という二つのテーマを既に行っている。若干説明すると、前述のように1ギガヘルツにするためには24テスラの超電導磁石の開発が直接の目的になる。現在の22テスラの超電導磁石に、ブースターコイルとしての高温超伝導線コイルを入れて2テスラのかさ上げを行うという方法である。実際には、これは相当に技術の高い問題である。

一般に高温超伝導線は、臨界磁場は高いが、臨界電流が非常に小さい。我国で最近開発されたビスマス系の高温超伝導線は、従来の高温超伝導体の約2倍の臨界電流を持つことができるので、手始めに今NIMSで作っている装置に使おうとしている。問題点として、この高温超伝導線は永久電流モードにできないので、外部電源を使う計画が進められている。しかし、十分に高安定度の外部電源が必要ということは、使い勝手が悪く、商品として売れるようになるかどうかはわからないが、JSTで支援している。

もう一つの超高感度への挑戦は、阪大蛋白研究所の藤原教授、日本電子、福井大学の出原特任教授がやっている。ダイナミック・ニュークリア・ポーラリゼーションといい、たんぱく質などの試料にフリーラジカルを入れ、その電子スピン共鳴と二重共鳴させて核スピンの分極率を大きくするという方法である。分極率が1000倍になれば、感度は1000倍になる。この計画では、NMRとESRを同じ磁場で検出しようとする。現在のNMR装置が14.1テスラで600メガヘルツなので、同じ14.1テスラの磁場でESRをやろうとすると、394ギガヘルツの周波数が必要となる。また、二重共鳴をさせるためには相当のパワーが必要で、そのためのミリ波の発信器として、福井大学で開発しているジャイロトロンを使おうとしている。これが成功すると感度が1000倍になる予定で、世界中が関心を示している。

S1-5 走査プローブ顕微鏡 (STM,AFM,SNDM)

大阪大学 森田清三

本年のマテリアルズトゥデーという、材料関係の学術誌に材料関係でトップテンのアドバンスを過去50年間から拾ったというものがあった。半導体のロードマップが1位で、2位にSPMが来ている。材料そのものよりも、それを支える技術が上位になり、その中にSPMが入っている。これは非常に大事なことだと思う。その説明もついていて、要するにSTM（走査型トンネル顕微鏡）、AFM（原子間力顕微鏡）のようなツールの究

極のインパクトは、非常に広い範囲に及び、材料科学だけではなく、エレクトロニクス、オプトエレクトロニクス、医学、触媒、さらにエネルギーとか環境の問題に対してのソリューションも与えるであろうと期待が高い。

我々は、超高真空のAFMを使って、室温で複素系とか多元素系のナノ構造体を作る技術の開発をしている。バイオの高分子反応の観察を目指して、金沢大の安藤先生などが高速AFM、京大の山田先生などが原子分解能の分析AFMを研究していて、最終的にはバイオ分野に画期的な進歩が期待できると思われる。さらに、東北大の長先生などが非線形誘電率顕微鏡研究をしている。世界中で研究されていて装置的に新しい話ではないが、単一分子の引っ張りについては、特にドイツ、日本あたりが割と活発に研究している。技術的にAFMが変わりそうな話としては、ドイツのギーシブルなどが研究しているような自己検出型AFMがある。

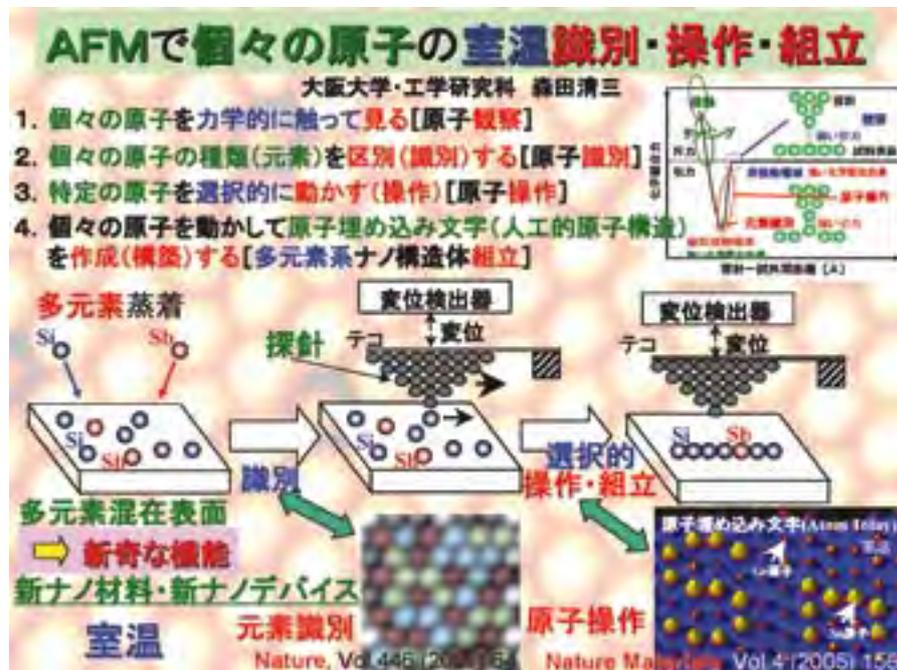


図11

我々は図11に示すように、例えば多くの元素の中から、特定の元素を選んで特定のところへ持って行って物をつくるという技術を室温で実現しようとしていて、今は2種類以上の元素がまざった状態で原子文字を書くところまで来ている。また、京都大学の山田先生のグループでは、液体中で原子・分子分解能が実現しており、例えばバクテリオロドプシンが欠陥も含めてきれいに見える。マイカもきれいに見える。水中なので、水の吸着構造を原子分解能で見られるというところに来ていて、今世界中で注目されている。

金沢大学の安藤先生は、高速AFMをねらっており、モーターたんぱくの内部構造の変化も含めた動きがリアルタイムで見られるところまで来ている。また、走査型キャパシタンス顕微鏡の次世代版で非線形誘電率を測り、昨年位に、シリコン（111）の

(7×7)構造について原子分解能を達成している。さらに、フラッシュメモリ中の電子やホールを直接検出することができるようになってきた。

海外では、IBMのグループがアルミ酸化膜の上のマンガンのスピントリプルを観測して常磁性を証明している。また、銅ナイトライド上のマンガンが反強磁性になっているとか、GaAs上にMn原子を乗せて高電圧パルスを印加してGa原子とMn原子との交換を起こすことができるといった面白い話が種々出てきている。

全体的にみると、米国はSTM中心で、AFMの特に最先端の技術は少し遅れており、日本とヨーロッパがAFMに優れている。特にヨーロッパはAFMだけではなく、スピン偏極STMなどを含めた、全体的な技術で非常に進んでいる。

S1-6 質量分析装置

大阪大学 豊田岐聡

質量分析とは、イオンの質量電荷比と存在度を測る手法であり、他の分析手法より高感度で、微量でも測定できる。ピコ(10⁻¹²)モル、フェムト(10⁻¹⁵)モルを超えて、現在ではアト(10⁻¹⁸)モル、zepto(10⁻²¹)モルという程度でも測れるというのが最大の特徴である。電荷を持たせるイオン化手法と質量分離法に多くの種類がある点もNMRやエックス線と大きく異なるところであり、両者の組み合わせは非常に重要であり、これが多くあることが質量分析のメリットでもあり、質量分析を難しくしている点でもある。

質量分析は、J・J・トムソンが約100年前に最初に行い、日本では阪大が1930年代後半に初めての質量分析装置を作り、今や生体関係に広く使われるようになった。阪大関係では、松田先生の質量分解能120万という現在なお磁場型では世界最高の分解能の装置や、飛行時間型の世界最高の分解能を誇る我々のマルチターン飛行時間型質量分析装置がある。

質量分析は、殆ど全ての分野で使われており、原子、分子、クラスター、半導体、化学、生物、薬学、創薬では当然のように使われ、医学でも最近では使われおり、次第に臨床でも使われ出している。さらに、安全・安心関連の爆発物や毒ガスの検査にも高感度を生かして質量分析が用いられ始めている。また、ロケットなどにも積まれており、変わり種としては、考古学関係で¹⁴Cの同位体比測定により年代推定を行うためにも用いられる。

質量分析の研究開発をしている大学とメーカーの人数では、圧倒的にユーザーの人数が多い。昔は、大学の研究者もメーカーの数も多かったが次第に減ってきてつつあり、特に日本国内では状況が悪く、また産学の連携が弱い。したがって、我国の使う側は、欧米の1から2年後を追いかけている状態であり、装置開発も国外メーカーを5、6年後追いしており、一部の分野で辛うじて先行しているに過ぎない。現状では、欧米メーカーの製品を購入する人が多いが、その理由はソフトウェアにあると思われる。

この十数年の間に開発された新技術の例

分析部

- マルチターン飛行時間型質量分析計 (阪大)
- Orbitrap (Thermo Scientific)
- デジタルイオントラップ (島津)

イオン化

- DESI - Desorption Electrospray Ionization (Purdue University)
- EDI - Electro sprayed Droplet Impact (山梨大)
- DIOS - Desorption Ionization on Silicon (Scripps Center for Mass Spectrometry) → SALDI - Surface Assisted Laser Desorption Ionization
- DART - Direct Analysis in Real Time (JEOL USA)

検出器

- 超伝導検出器 (産総研)

測定法

- イメージング質量分析

参考: http://www.jpo.go.jp/shiryo/s_senetsu/hyogun/gijutsu/mass/mokaji.htm

図12

質量分析で最近開発された技術は、最近15年間位でも図12に示すように多くある。例えば、ヨーロッパのオービトラップは最近製品化され、良く売れるようになった。島津もデジタルイオントラップという技術も開発した。イオン化については、日本では山梨大などが精力的に開発している。検出器としては、産総研で超伝導を使った検出器などが使われるようになってきた。測定法としては、イメージング質量分析が今一番のブームになっており、日本でも大きなプロジェクトがたくさん走っている。阪大のマルチターン飛行時間型質量分析計は、閉じた空間を何回も回すことでイオンの飛行距離を稼いで分解能を上げている。きちんと光学的に収束するような系を設計し、35万という飛行時間型では世界最高の分解能を実現している。



図13

阪大が関係している大きなプロジェクトとしては、JST大学発ベンチャー創出推進事業では、マルチターン飛行時間分析装置をさらに小型化して、図13に示すようにベッドサイドに置いたり、可搬型にして多目的使用を可能にしたいと考えている。また、質量分析とその像を同時に見ることを目的としたイメージング質量分析には、二つの手法があり、1次ビームをスキャンし、それぞれの点から出てくる質量スペクトルを合成して像にするのが一つ目の方法。もう一つは、広くビームを当て、そこから出てくる像をそのまま質量分析しながら像として検出する。前者では、科研費学術創成研究やJST先端計測技術・機器開発事業のプロジェクトが走っている。また後者のタイプは、CRESTの支援を受けて開発している。

また、装置を作るのは良いが、その装置を使うことを考えないといけない。質量分析では応用範囲が非常に広いので、学際的な取り組みが必要である。アプリケーションを含めたソフトウェアをきちんと議論する必要がある。そのためには、質量分析センターのような装置開発者とユーザーの交流をはかる環境が必須であると考えられる。また装置開発の人材育成など多くの課題が挙げられる。

S1 ディスカッション（Q：質疑、A：応答、C：コメント）

- Q 米国で主張されているのは、スーパーコンピュータの活用、もう一つがユーザー側の視点である。
- A 生産現場では、既に完全にコンピュータを使う世界に入っている。そのために今、見る必要があると、さらに、見た後をものづくりにつなげるものが欲しい。日本の先端計測はやはりソフトウェアが弱い。
- C 先程の講演の中で、「実験とモデル計算の融合の時代」へと書いてあるが、これが基本ではないかと思う。ちょうど1年前に亡くなった、パークレーの理工学部長をやっていたリチャード・ニュートンが盛んに言っていたことだが、IT（情報）、BT（バイオ）、NT（ナノ）の融合によってモデリングをした上でプレディクションができ、ビジュアライゼーションができ、新しい近代科学実験の方法論ができる。
- C 物と対話しながら分析を現場の物づくりに使おうという立場にいる。一番知りたいのは、製品がどのようにできているかである。例えば、ナノ材料は、ナノの挙動、性質に合わせたナノプロセッシングをしないとマクロ機能に発展しない。ナノ素材は非常に個性的であり、いろいろな特徴を持っているが、それを計測器でデータとして顕在化できない。大学や研究所のサイエンスをものづくり現場の人にトランスレーションするために、現場の人がわかる言葉に置きかえなければならない。彼らにナノの挙動をフィードバックしなければいけない。表面、界面、濡れなどは接着をする物づくりに絶対に必要で、それをフェムト秒から秒までの動的計測で顕在化しなければいけない。エネルギーと位相を合わせてやらないと材料は機能しない。さらに、電子顕微鏡で収差補正により細かく見るだけでなく、

環境を実環境にする。また、種々の装置で複合的に見ることも必要である。

- C この20年間くらいの日本では、皆がサイエンスに興味を持っていない。出来たものしか面白くないというところがあった。私かそれ以上の方々は、子供の頃にプラモデルを作ること面白く思っていた人が多い。ところが、10年位前からプラモデルの店のおじさんがプラモデルを作って渡すと、子供たちは喜んで周りの人に見せびらかしている。何故作るところが面白くないのか、物すごく残念である。
- Q 田中先生はノーベル賞をもらったが、なぜ島津の質量分析計の国際シェアが10%位しかないのか、ここが一番の日本のポイントだと思う。今の山中先生のiPS細胞でも全く同じことが起こる可能性がある。そのあたりを専門家も政治家も役人も共有しなかったら絶対勝ちはない。
- A 会社の中で、たとえ製品になる前でも発表すべきだという目ききの人があった。日本にも、阪大の松尾先生、松田先生、その方々が私を見つけてくれた。さらに世界で、私の業績をいわば宣伝してくれた目ききの方々がいらっちゃった。ところが、一方で、日本には、いわゆる死の谷を乗り越えるシステムがない。例えば、非常に良い技術を学会発表する。欧米では、「それは画期的だ、将来的に伸びる可能性が高い、一緒にやろう、お金も負担しよう。」と言ってくれる。ところが、日本の、例えば、製薬メーカーは、「良い装置と言われても私たちはよくわからない。性能評価はするので、お金を払ってほしい。」となる。この違いが大きい。アメリカなどでは、先端的なことを育てるためのドネーションが大きい。ドネートされた方が、自分たちは世の中のために役立ったのだと思えるようなシステムがある。日本ではそこがまだまだ確立しておらず、お金をどのように世の中のためにうまく回していくかということがまだ出来ていない。
- A 日本の文化の問題であり、日本は部品を出すということでこれから生きていくことが戦略であるという気がする。アセンブルした装置全体を作ったり、パソコンのソフトウェアを日本で作るということは出来ないのではないか？これは、産業構造の今後のあり方にもかかわることだと考えられる。

2.4 セッション2 先端産業のニーズに寄与する革新的計測・分析技術

S2-1 新しい原理によるTHzテクノロジー

福井大学 安岡義純

近年、光と電波の境界領域にあるテラヘルツ (THz) 波が多くの研究者の注目を集めている。このテラヘルツ波は、一般には、1THzを中心に、0.1THz (波長: 3 mm) から10THz (波長: 30 μm) の周波数領域に位置する電磁波のことであり、この領域の電磁波は、水分による吸収が大きく電波伝搬には適していないが、プラスチック、紙、ゴム、繊維、木材、乾燥食品、脂肪、半導体、誘電体等可視光に不透明な多くの物質を透過し、レイリー散乱の影響を受け難いために粉体も透過することができ、エックス線の100万

分の1の光エネルギーのためエックス線に比べて人体への安全性が高いという特徴を有している。一方、多くの気体や液体、固体などの振動準位や回転準位がテラヘルツ帯にあるので、テラヘルツスペクトルを測定することによって物質の特定ができる可能性を含んでいる。しかしながら、テラヘルツ帯での光源や検出器の開発が非常に遅れており、長い間、未開拓周波数領域と呼ばれ、産業的にもあまり注目されなかった周波数領域である。

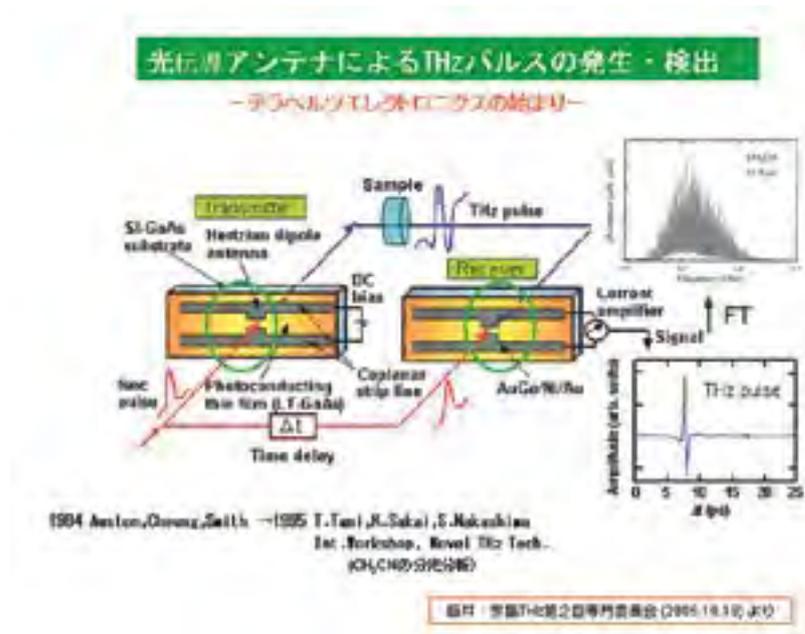


図14

この未開拓周波数領域がテラヘルツ領域と呼ばれて多くの研究者の注目を集めるようになったのは、テラヘルツ時間領域分光法 (THz Time-Domain Spectroscopy; THz-TDS) という新しい分光法が登場してからである。この分光法は、その一例を図14に示しているように、超短パルスレーザーの照射によって発生したテラヘルツパルス波を試料に入射させ、試料を透過した後のテラヘルツパルス波の波形を時間分解計測し、その波形をフーリエ変換することにより周波数ごとの振幅と位相を得るという新しい分光法で、測定で得られた振幅と位相を解析することにより、試料の誘電率や屈折率の周波数依存性を調べることができ、さらには誘電率の周波数依存性から試料の物理的・化学的な性質を調べることができる測定法である。この測定法は、1984年Austonらによって（国内では1995年阪井氏らによって）報告されて以来、急速にその応用が拡大した分光法で、テラヘルツ領域を常温で測定できしかも高いS/N比を有しており、広帯域の周波数スペクトルを短時間で観測でき、超高速時間変化に対応できるという従来の分光法にない特徴をもっている。

テラヘルツ時間領域分光法により上記のテラヘルツ波の特長を生かした物質の物理的・化学的性質の探索が可能となり、さらにイメージング技術を加えることによって、

材料分析分野のみならず、食品、バイオ、医療、環境、生活、安全・防犯、さらには通信・電子等の多岐にわたる分野（図15を参照）への応用が期待され、テラヘルツ時間領域分光装置の開発やテラヘルツ帯に発振線をもつレーザー発振器や検出器の開発とともに、分子構造同定、生命科学の研究、半導体物性研究等の基礎研究とともに、医薬品の研究開発、隠匿された危険物の発見、違法薬物の発見等、あらゆる応用可能性に向けての基盤研究が多くの研究者によって精力的に行われている。

現段階では、実用段階に入っているテラヘルツの応用例は、空港での郵便物検査システムの構築やTeraView社等国内外の数社で発売されているテラヘルツパルス分光装置、ThruVision社から発売されている監視カメラ装置等、幾つかのものを除いて決して多くない。しかし今後は、これまで可能性の追求を目的としてなされてきた研究成果を基盤として、実用化に向けての研究開発が大いに進むものと期待している。

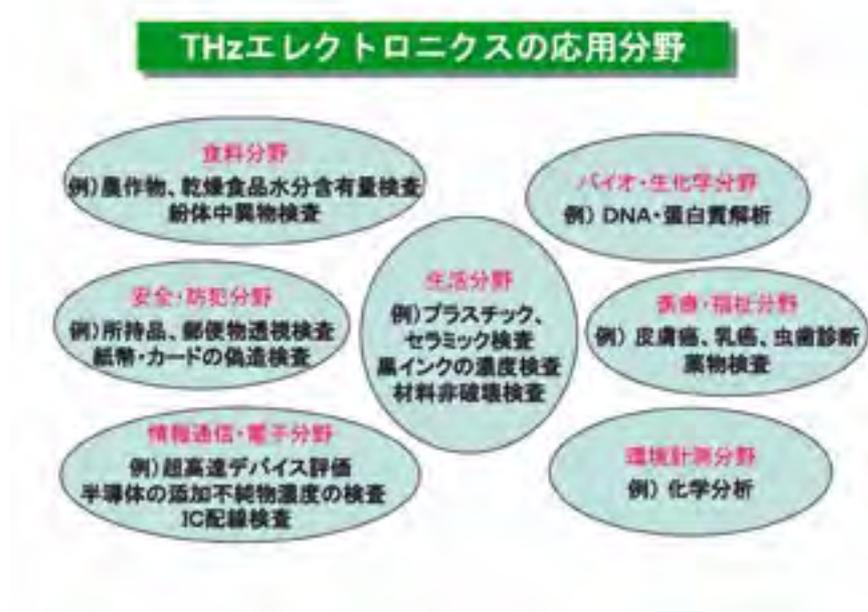


図15

テラヘルツ技術の実用化のためには、各種材料や化学物質のスペクトルデータベースの整備が非常に重要になる。また、解析ソフトの開発・充実が大きなキーポイントになる。さらに、信頼性が高く、安価で、簡便に測定できるテラヘルツ時間領域分光装置分光システムの製作、高輝度テラヘルツ光源や高感度検出器の開発が必要となる。

世界的にみると、アメリカでは主として安心安全の分野に、イギリスでは主として医薬品開発分野に、ドイツでは基礎研究の分野に重点を置いた開発研究が進められている。では、日本では今後何に重点を置いて開発研究が進められるであろうか。2005年に策定された第3期科学技術基本計画の中には、テラヘルツ技術に関連した重要な研究開発課題として、2015年までに、①リアルタイム測定可能なテラヘルツ分光イメージングを可能にする光源と検出器の開発、②ナノ構造を利用した高感度で室温動作す

るテラヘルツ検出器や高精度テラヘルツ光源の開発、が挙げられ、2011年までにテラヘルツからX線までの各種イメージング技術を整え、生体膜や細胞内器官が機能する仕組みを解明することが要求されている。さらに、安全安心関連では、2007年度までに爆発物等の個別特定や非金属の凶器や爆発物の検知を可能にする検査技術、2015年までに各種梱包された違法物質の非開封探知装置の開発などが挙がっており、これらを目標に研究開発を進めていくことも必要である。

S2-2 表面プラズモン利用分光

大阪大学・理化学研究所 河田聡

プラズモン分光よりは少し広く、図16に示すプラズモニクスについて話させていただく。

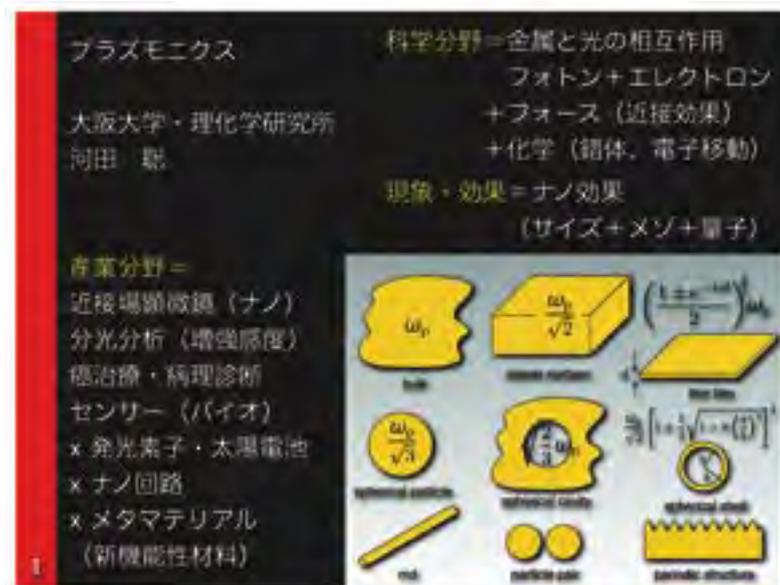


図16

「プラズモニクス」とは、金属ナノ構造とフォトンの相互作用の化学である。図に示すように、様々な金属ナノ構造（金属表面、金属薄膜、金属微粒子、金属中の空洞、金属ワイヤ、金属周期構造）が新奇な現象や効果をもたらす。プラズモンとは金属内の自由電子の集団的振動の量子であり、フォトンを伴う。また、その効果はナノ構造の近接でしか得られないためフォース顕微鏡や化学的効果をも伴う。その意味で、プラズモニクスとは極めて学際的な科学であり、物理・ナノサイエンスはもとより、バイオ・医療、化学、エネルギーなどの広い自然科学と産業への展開が議論されている。欧米ではMURIやEUネットワークなどのプロジェクトが推進されており、多数の国際会議が開催されている。世界における日本のプレゼンスは河田グループ以外はほとんど見えない。

プラズモニクスの産業化は、欧米ではほとんどがベンチャービジネスが担っている。マーケットが小さいうちは大企業の参画はなく、創業者利益は欧米のベンチャーが得る。私自身もナノフォトンというベンチャー企業（正確にはスモールビジネス）を創業しているが（年商2億円程度の製造業）、日本の社会は、大企業・有名企業の製品を買う文化があり、性能が高くてなかなか売れない。欧米のベンチャー製品は買っても、日本の最先端計測機器ベンチャーの製品はまず買わない。国は、起業支援や起業助成をする必要はない。自己責任で、会社は立ち上げるべきである。しかし優れた技術と商品を持つ最先端計測機器ベンチャーの信用を高めるために、国機関は発注や投資の形で協力して欲しい。欧米と日本のベンチャー支援政策は全く異なるものである。

プラズモニクスで扱うのは、基本的には金（キン）である。金は体の中に入っても害を及ぼさず、種々の良い効果をもたらす。数十ナノメートルのシリカに金をコートしたナノシェルでは、プラズモンのモードがスプリットして近赤外に吸収を持つ。したがって金のナノシェルが体の中に入っていて、そこに近赤外光が当たると温度が上がる。つまり、局在化したプラズモンが共鳴して、熱を持って温度が上がる。もし、ナノシェルががん細胞にだけくっつくようにすれば、図17のように手術をせずに治療ができる。



図17

金属は自由電子の海であり、電子の集団的な振動であるプラズモンが誘起される。ただ、プラズモンが伴う光は、普通に伝搬する光とは分散関係がずれており、金属の表面近くにのみ存在できる表面波となる。もし金属にナノサイズの刻みやラフネスを入れて光を入射すると、光がプラズモンにカップルし、光のエネルギーはプラズモンのエネルギーに変わる。したがって、金属は光の貯蔵庫として使えると、私が言い出した。要するにエネルギーが金属中の電子の集団的な振動に置きかわっているわけで

あるが、振動にだけ移ったら熱になって消えてしまう。貯蔵庫である限り、読み出せる必要があるが、共鳴交換でそれができる。レーザーも作れる。プラズモンセンサーの原理は、実は1902年に既に書かれていたが、日本で最初に作ったのは自分であり86年ごろのことである。

今我々が興味を持っているのはラマン散乱への応用である。ラマン散乱はとても暗く、通常はレイリー光に邪魔されてほとんど見えないが、金属ナノ構造を近くに持ってくると金属表面の強い電場が分子に当たって、分子からのラマン散乱光がまた金属ナノ構造に当たって表面プラズモンを励起し、ラマン散乱光が非常に明るくなる。これを実現するためには、それに適した構造の金属プローブを作る必要がある。私たちは、最適化されたプラズモニックプローブを作り、800ナノメートルの波長の光を使って15ナノメートルの構造が見えるようにした。

AFMと似ているが、これはスペクトロスコピーであり、ラマン波数シフトによって見える分子が変わる。したがって、これは光を使ったスペクトロスコピーで分子イメージングを行うことができる。現在は、15ナノメートルが限界なので、0.3ナノメートルが必要なDNAの塩基の一つずつを見ることはまだとても無理だが、ブレークスルーがあと一つ二つあれば可能になると思っている。別の応用として、シリコンのひずみによる格子間隔の変化も、その歪み分布を金属針は可視化してくれる。さらに、プラズモン共鳴を起こす金微粒子が細胞の中に入って動いていけば、細胞の中のたんぱく質の分布と微粒子の動き方を通して、細胞の機能ダイナミズムを追いかけることができる。

今アメリカではマルチディシプリナル・ユニバーシティ・リサーチング・イニシアチブのテーマとして、プラズモニクス関連が二つ、ヨーロッパではEUネットワークでプラズモニックデバイスというものが走っている。日本はまだそれほどではないという感じである。この分野の産業は、大学発ベンチャーが支配的であるが、日本では、構造的な問題が大きく大学発ベンチャーは苦しんでいる。

S2-3 イオンビーム計測

京都大学 木村健二

イオンビーム分析のひとつのラザフォード後方散乱法（RBS）を例にして、現状と今後の課題を話したい。

RBSでは図18に示すように、数100 keVのヘリウムイオンを試料にぶつけて、ラザフォード散乱で後方にはね返ってきたイオンを普通は半導体の小さな検出器で測定する。通常は10ナノメートル位の深さ分解能だが、はね返ってきたイオンのエネルギーを正確に測れば深さ分解能が上がるので、磁場型の分析器を作って1原子層まで分解できる0.2nmの分解能を実現しているのが、私の開発した高分解能RBS（HRBS）である。HRBSは、通常のRBSと同様に定量性が非常に良く、SIMSほどは破壊的ではなく、深さ分解能が良く、測定時間は10分程度と短く、試料の前処理は不要で、真空槽に入れ

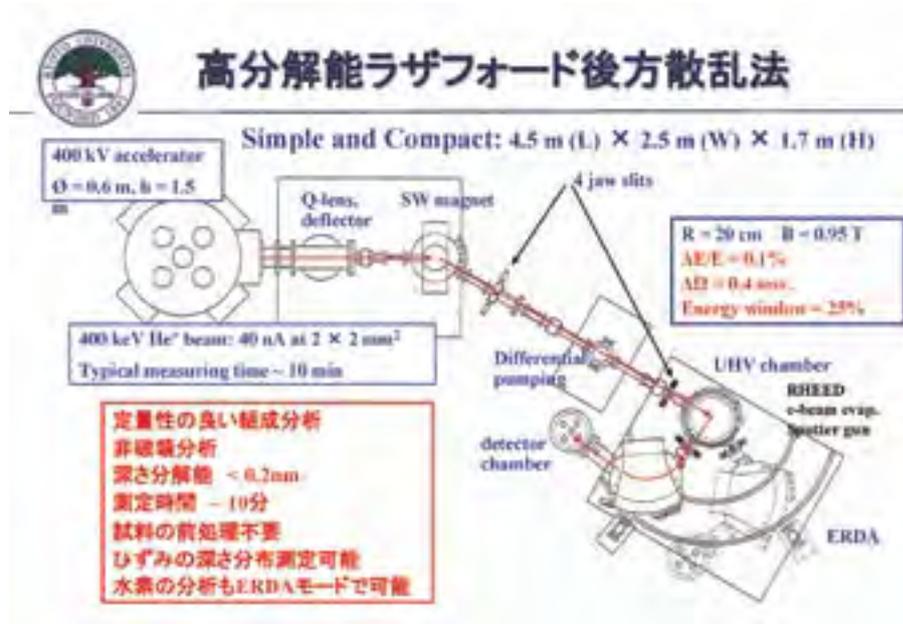


図18

ばすぐに測れる。神戸製鋼と共同で、この10年間に主として日本国内に10台ほどが販売された。最初にスタートするにはベンチャーではなかなか苦しいが、大企業であったのでスタートできたと考えている。

高分解能RBSで何が見えるかの例として、鉛とセレンの化合物半導体を測ったスペクトルには、間隔が0.3ナノメートルのピークがいくつか見えているので、原子層ごとの分析ができています。ただし、1原子層ごとの分析ができるのは表面だけに限られる。つぎに、最近化学の分野で集中的に研究が進められているイオン液体を分析した例として、あるイオン液体においては、弗素が一番表面に、その次に硫黄があり、その次が酸素であり、分子がどういう向きを向いているかまで明らかになる。

前述の非破壊で良好な定量性、表面で0.2ナノメートルくらいの深さ分解能、短時間測定可能、試料前処理不要といった長所に対して、弱点は、ミリメートルオーダーの横方向の分解能である。さらには、軽元素の感度が悪い、深くなると分解能が劣化、結合状態は評価できない、という弱点があり、ほかの分析方法と複合化することによって克服できる。また、場合によっては多重散乱の影響が強いので、シミュレーションをきちんとしなければならない。横方向の分解能向上については、まず、マイクロビームにするというのはそれほど難しくない。さらに、液体金属イオン源を使えば、数十ナノメートルのイオン幅で数十ピコアンペアくらいのビームができる。最近、カールツァイスの子会社が開発した新しいタイプのイオン源ALIS、アトムレベルイオンソースでは、サブナノメートルのビームサイズが可能だと主張している。これは、要するにFIMの原理で、ヘリウム中のチップに高電圧をかけると、一番電界の強いトップのところからヘリウムイオンが放出される。それをレンズで絞れば非常に明るい小さ

なビームを作れる。ただ、残念ながら使っている検出器のエネルギー分解能が非常に悪いので、深さ方向分解能が悪い。

深さ方向も含めて分解能を上げるためには、やはり高エネルギー、高分解能のエネルギー分析器が必要になる。ただし、イオンによるダメージが問題となる。したがって、立体角が非常に大きな分析器が必要になる。一つの候補として、私も少し絡んで開発したサイクロトロンRBSがある。これは超伝導マグネットで、試料ではね返ってきたイオンをサイクロトロン運動させて、アパーチャーを通り抜けたものだけをディテクターで見る。こうすることによって、広い散乱角に出てきたイオンを一度に分析することができる。

RBSでは化学結合状態分析は無理だが、図19に示すように、角度分解XPSと組み合わせることによって、これも可能になる。角度分解XPSをデータ処理するには、数学的に非常に厄介な解析が必要であるとか、光電子の弾性散乱の影響を無視して処理していることが多いので、HRBSの結果を拘束条件にすることによってXPSを精度よく解くことができることになる。

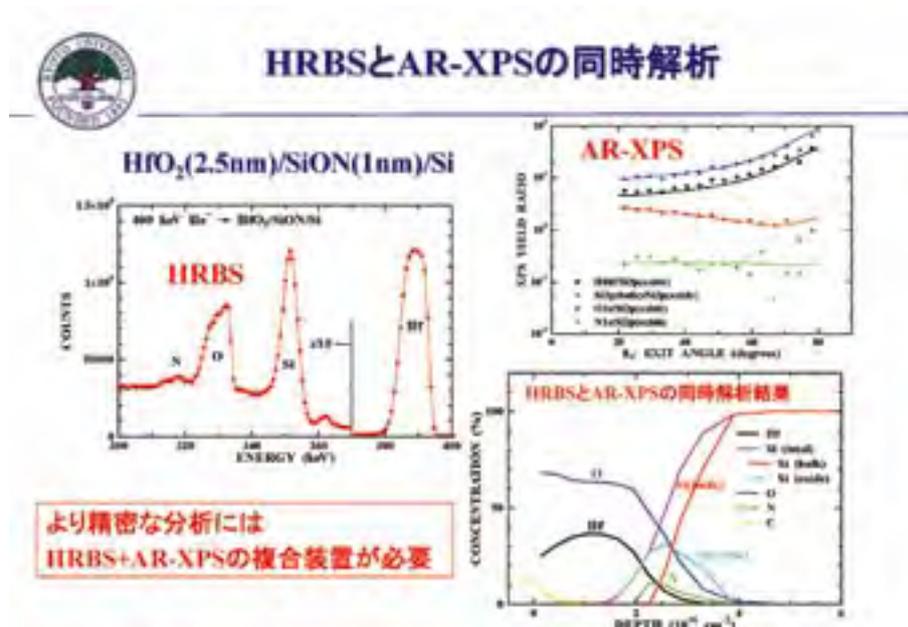


図19

S2-4 3次元アトムプローブ現状と展望

(独) 物質・材料研究機構 宝野和博

3次元アトムプローブについて、現状と展望を話させていただきます。

例えば、最近の金属材料は組織がナノスケールにまで非常に微細になっているので、特性と構造の因果関係が不明であるとプロセス設計ができない。従来、企業などではプロセス条件を力づくで変えて、たまたま特性が出たら材料として開発するというのをやっていたんですが、この長くかかる時間を構造解析で組織と特性の因果関係を解

明することによって、ナノ組織を活用した材料の開発を加速していこうという研究を行っている。

この分野で最も有用な手法は、電子顕微鏡であるが、電子顕微鏡でどうしても超えられないところもある。例えば、2ナノメートル、3ナノメートルの原子のクラスターは、バルク上のマトリックスに埋もれてしまう。また、電子顕微鏡の像は、3次元構造の2次元投影である。このことから、例えば離れた粒子もくっついて見えてしまう。したがって、新しい手法が必要となり3次元アトムプローブが考えられた。

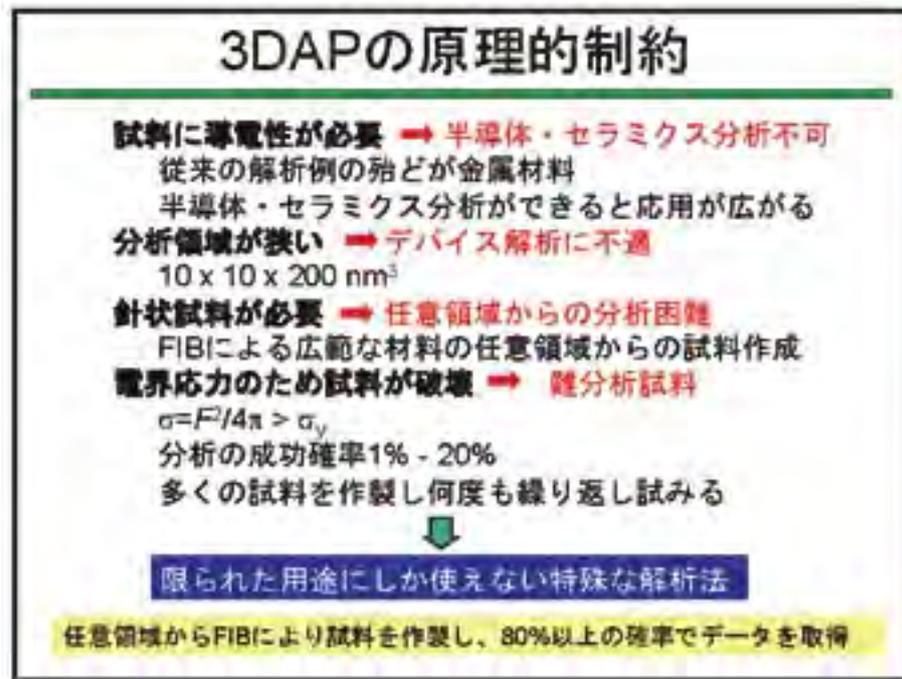


図20

3次元アトムプローブは、電界イオン顕微鏡（FIM）をベースとして、極めてシャープな針状の試料に電圧を掛けると試料表面で突き出た原子を投影した像が撮れる。これがFIM像であるが、さらに高い電圧を掛けると原子がイオン化する。このイオンをタイム・オブ・フライト（TOF）により解析する。すなわち、原子を1個ずつイオン化させて、TOFを求めて、同時に個々の原子の座標を決めていく。これによって原子分解能で2次元の原子マップがとれる。さらに、原子は表面から順々にイオン化していくので、経時的に観察すると3次的にどこにどういう原子があるかを見ることができる。TOFの分析には質量依存性がないので、例えば鉄鋼材料などで重要な軽元素の定量分析もできる。

例えば、コバルトクロム鉄アルミニウムというスピントロニクス用の電極材料をエネルギーフィルターTEMで調べるとクロムリッチであることはわかるが、クロムが何パーセントかという情報までは出ない。アトムプローブを使えば、原子1個ずつを見ることができるので、クロムが80、コバルトが20、アルミニウムはほとんど入ってい

ない、といった情報が得られる。

アルミニウム、銅、マグネシウム、銀の合金の中の板状の析出物を見た例では、電子顕微鏡のSTEMでは、マグネシウムという微量元素がどうなっているのか一向にわからない。どの程度入っているかもわからない。ところが、アトムプローブでは、銅とマトリックスの界面にほぼ2原子層に亘り銀とマグネシウムが強く偏析している様子がわかる。このように、アトムプローブは金属材料のナノ解析には非常に有効で、鉄鋼メーカーでは長い間使われている。

アトムプローブの原理的な制約としては、電界蒸発を使うので、試料に導電性が必要で、したがって、これまで半導体解析の例は非常に少なく、セラミックスはほとんど例がない。また、分析領域が狭く、デバイス解析はなかなかできない。さらに、高電界を生じるための針状の試料が必要である。従来は金属を電解研磨していたが、最近ではFIBによって広範な試料の作成が可能になり、この問題はほぼクリアした。一番難しい問題は、表面での高電界による高い応力が材料の降伏応力を超えるので、分析する前に試料が破壊してしまうことであり、測定の成功率は1から20%程度である。FIBを使って一つの試料を作るのに4時間位掛かるとすると、これからのアトムプローブ測定の成功率は80%以上としたい。そのために、我々は、電界蒸発にレーザーパルスを使い、試料検出器間距離を短くしたワイドアングルな3次元アトムプローブの試作機を作って実証試験を行っている。レーザーを使うことによって半導体の解析が可能になってきた。例えば、シリコンとニッケルの界面にできたニッケルシリサイドやガリウム砒素の原子1個ずつの解析ができる。今までの大部分の適用例が金属であるが、今後は情報化産業の材料にも使われる。スピンバルブを解析してみると、強磁性の電極の間にナノオキサイドレイヤーというメタルのナノスケールのパスがあって、周りが絶縁体になっている。この3次元のナノ構造を作り込んでGMR比を挙げているデバイスが作られている。つい最近までアトムプローブは自作であったが、アトムプローブの有用性が高まってくると、ベンチャー企業が始まった、アメリカやフランスのベンチャー企業は、シリコン中のハフニウムオキサイドといった半導体やデータストレージ材料分野に装置を売り込むことに成功している。このように、アトムプローブは、金属系素材産業からIT産業まで応用できる手法として現在発展している。

S2-5 フォトサーマル分光

科学技術振興機構 澤田嗣郎

フォトサーマル分光法は、光音響分光法の発展形で、物質に光を照射すると、光を吸収したのち、発熱過程に伴って元に戻る無放射過程を使う分光法と言える。図21に記した特徴を順に説明する。発熱による熱波や音波を測定して、中で何が起きているかを知ろうということであり、フェムト秒では電子の応答、ピコ秒だと分子の振動状態などの波が立つ。

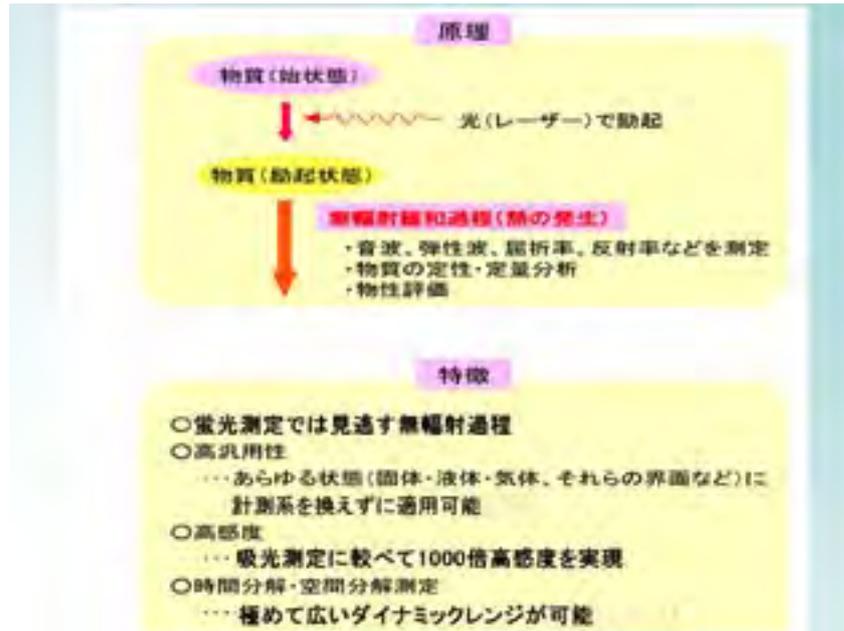


図21

光音響分光法とか光熱分光法では、音や熱のセンサーを使うので、非常に遅い測定になる。しかし、無放射過程というのはピコ秒とかフェムト秒とか非常に速い現象である。遅い分光法では限界があるので、できるだけ速い、起源解析も出来るような分光法であるべきであると考えていた。そこで、次のことを考えた。レーザーのようなコヒーレント光を分割したあとで合わせると、干渉波が立つ。干渉波なので、強弱が交互に現れ、一種の回折格子になる。そういった回折格子を使って、物質の表面に、今はTRG (Transient Reflecting Grating) と呼ばれているさざ波を立てる。その状態で、ある時間を置いてプローブ光を照射すると、1次、2次の回折光が出てくるので、バックグラウンドフリーの非常に高感度な計測法になる。例えばSiO₂がコートしてあるp形半導体Siに40ピコ秒のレーザーで回折格子を作り、時間を変えながらプローブ光でモニターすると、最初に光で励起されたキャリア密度のピークが現れ、次に熱生成に伴うゆっくりとした減衰が現れる。それに重畳して振動している表面弾性波が観測される。要するに一つの測定によって、光学的情報、熱的情報、音波的情報が一度にわかるという特徴がある。この方法をさざ波顕微鏡と呼んでいたが、数年経てからフィリップス社で装置化され市販された。

弾性波を見れば表面のかたさがわかるので、あるメーカーのダイヤモンドライクカーボンの硬度測定を手伝いした。窒素イオンの照射量を変えていくと、徐々に表面に立つ弾性波の振動数が変わり、硬くなっていくことがわかる。その後、ドイツがDLC膜を標準化する際に、この手法が一つの手法として採用されたので、ドイツではこの方法は有名である。

次の例として、金の薄膜の上に色素を吸着させて、この方法を用いると、先ほどの

河田先生の話しにあった表面増強ラマン散乱（SERS）が起きて、吸着している色素から非常に強いラマン光が出る。この光の解析により、光励起されたキャリアが直ちに吸着している色素に電荷移動（CT）することがわかった。SERSがジャイアントラマンとして発表された30年前から、メカニズムはCTと言われていたが、フォトサーマル分光を開発することによって、初めてCTを証明する学術的に貴重なスペクトルを得たと思っている。

欠点は、装置が非常に複雑である。たくさんのオプティクスも要る。そこで我々は、もっと簡易な方法として、透過型のグレーティングに近いところに試料を置き、励起光のゼロ次光により回折格子を作る。プローブ光に通すと、グレーティングで回折された光と、回折格子から出てきた信号光がまざり合っているので、ヘテロサイン検出が可能になる。バックグラウンドフリーで非常に高感度、しかも簡単なオプティクスで非常に効率よく測定できる。

もっと簡単な方法として中央大学の片山准教授が開発した手法では、連続光を当て続けておき、励起パルス光を入れると、そのときだけ回折格子ができ、ヘテロサイン検出をすると、オシロスコープ上にリアルタイムに過渡波形が見える。一例として、セレン化カドミウムのナノメートルオーダーの粒子だけでは再結合によって減衰するのに対して、酸化せずの上にセレン化カドミウムのナノ粒子を吸着させると減衰が非常に小さくなる。これは太陽光エネルギーが有効に酸化せずの方に電荷移動するというを示唆している。

NF-HD-TG法による測定例一覧		
測定試料	試料形態	主な測定結果
金薄膜	固体	10nm薄膜まで測定可能。
色素溶液	液体	ポピュレーションダイナミクス。
半導体ウエハー	不透明固体	キャリア寿命計測。
アントラセン	液体	光化学反応ダイナミクス。
ポーラスシリコン	固体(表面凹凸大)	発光過程にかかわるプロセスを解明。
イオン注入シリコン	不透明固体	従来法の1/10以下の注入量を計測可
CdSe量子ドット	粒子状固体	量子単位からの電荷注入過程。 (太陽電池材料)
TiO ₂ ナノ粒子	粒子状固体	結晶形によるキャリアプロセスの違い。 (光触媒との関連)
金ナノ粒子	不均一液体	核生成ダイナミクス。

CPL 442 89 (2007), 443 158 (2007), 427 192 (2006), 419 464 (2005), 377 589 (2003), APL 90 171117 (2007), 82 2775 (2003), JAP 94 4904 (2003)など。

図22

まとめると、図22に示すように、本法は、物質による光吸収を起源とする、光を散乱屈折させることのできるあらゆる現象を1本のプローブビームで、広い時間幅、フェ

ムト秒から秒までリアルタイムで追跡できる分光法であって、汎用性の高い分光装置、あるいは材料物性の診断装置になると期待されている。

最後に、本講演の一部には、中央大学の片山准教授の最近の研究成果が含まれていることを申しのべ、謝辞とします。

S2-6 X線分光 (X線装置技術)

京都大学 河合潤

X線分光には、シンクロトロン放射光を使った分光分析、X線管を使った汎用分析、主に医学診断に使われる透過像、CT、位相像や、最近ではコンプトン散乱像に加えて、ホログラフィーがある。今日は、X線管を用いた方法について俯瞰したい。

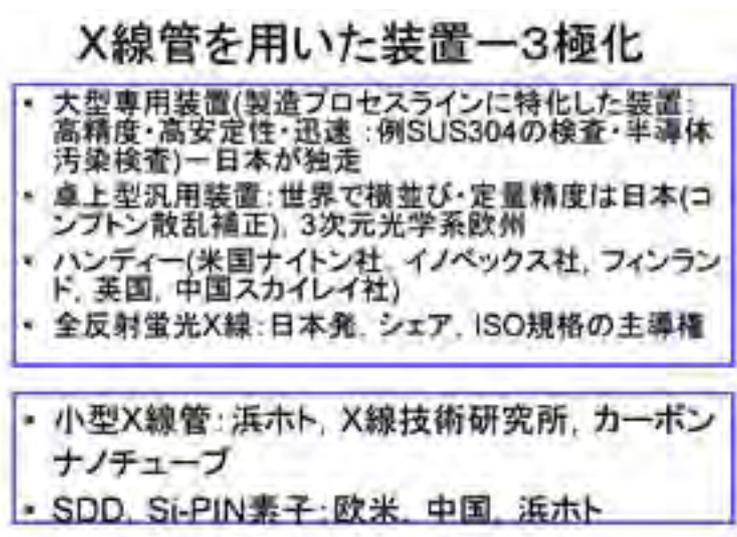


図23

図23にあるように、X線管を用いた装置は現在3極化が進んでいる。第1は、大型の製造プロセスラインに特化した専用装置であり、高精度、高安定度で迅速に分析することができる。例えば、SUS304の検査や全反射蛍光X線を使った半導体の汚染検査に使われている。第2番の卓上型汎用装置は、世界の多くの会社が開発して市販している。特に3次元光学系は欧州が先行している。第3番目のハンディー型とは、米国、フィンランド、英国が初期に販売し、最近では、中国が格安の値段で大きなシェアを占めている。日本は今後、中国のハンディー型を追いつけないであろうから、人に照射しても問題がないほど十分に弱いX線を使って、装置を更に小型化することが、目指すところと思う。全反射蛍光X線は、九州大学の米田先生、堀内先生が発明して、シェアも日本のメーカーが大部分をとり、ISO規格の主導権も日本が持っている。これが今後の機器開発の一種のモデルになると思う。

小型X線管に関しては種々のものが出ている。一例として、ヘアドライヤー型の装置でSUS347を測定すると、10秒間で0.096%のモリブデンが含まれるというようなこと

まで分析できる。ヘアドライヤー型はまだX線が強いが、全く人体に害がないレベルの弱いX線でppbの低濃度まで分析できれば社会的に大きな影響がある。

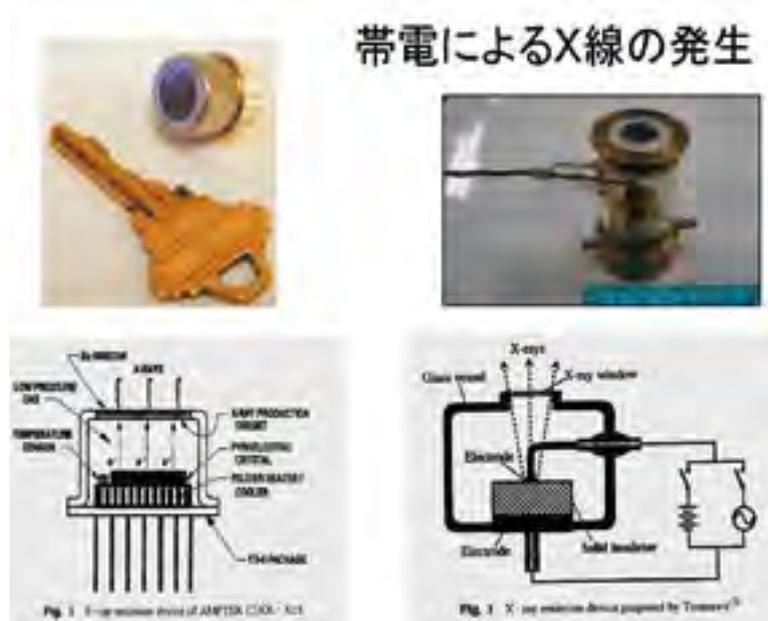


図24

X線の要素部品については、浜松ホトニクスなど日本の企業が強い。また、島津製作所の副島さんのキャピラリーの特許や、産総研の富江さんのアルミニウムブロックに穴をあけたX線レンズ、および図24に示すごとく当時東芝におられた寺澤さんが考案した帯電によるX線源など日本発のアイデアが豊富である。また、強誘電体を冷却すると100キロボルトのX線が発生するので、原理的には核融合につなげることができる。このように、X線分析に限らずほかの分野への応用も可能である。

S2 ディスカッション (Q: 質疑、A: 応答、C: コメント)

- C ある装置によって産業にイノベティブなことが起これば、ユーザーがその装置は良いと思って多数買う。たくさん売れば、装置もイノベティブになる。そういう関係がベストと思うが、先端分析装置でそこに至るのはなかなか難しい。
- Q 半導体材料に関する計測で求められるのは、構造、組成、点欠陥である。宝野先生に聞きたいのだが、広い範囲のアトムプローブでは、結晶粒径、結晶の違い、組成、点欠陥は見えるのか？
- A 半導体ではなく、金属を例にとるが、金属においても、例えばアルミニウム合金やマグネシウム合金の時効を考えるために、空孔の情報は欲しい。そのときには、アトムプローブで溶出を見て、空孔は陽電子で見るというふうに複数の手法を使う。結晶のサイズについては、アトムプローブは微細な試料に適している。3次元アトムプローブでは、結晶粒界などは見えるが、構造を決定することはできない。

構造を解析したいのであれば電顕などの相補的な手法を使う必要がある。

- C 民間は、公表していないテラヘルツ分光のデータを多く持っている。レジストとして使うカゼインに現れるテラヘルツピークは、ある処理を加えると消える。逆に考えると、吸着、クラスター化、配列、結晶化、組織化していく過程の中に、テラヘルツのピークが現れる現象があると思われる。したがって、非平衡で制御困難な領域でテラヘルツスペクトルを同時にモニタリングすれば、現場で起こっている組織形成過程を明らかにすることが出来ると思う。このように、テラヘルツ分光を位置づけていけると思っている。
- Q 例えば半導体の分野では、構造とか組成とか点欠陥を一括して複合計測ができるかどうか。どのくらいのニーズがあるのか。本当に組み合わせることに意味があるのか。
- A 今の半導体産業における材料は急速に種類が増えている。また、最近では、界面同士が接近してきて、一つの界面で起こった現象がもう一つの界面に移動して影響を与えるという現象が出てきている。したがって、組成、構造、点欠陥をトータルで理解するというニーズが最近出てきている。同時に、ハーフピッチ32ナノメートル、22ナノメートルに対応する微細加工や材料設計、プロセスに対して、現行の計測技術が追いつけるかが不安である。

2.5 セッション3 新産業の創出に寄与する未来計測・分析技術

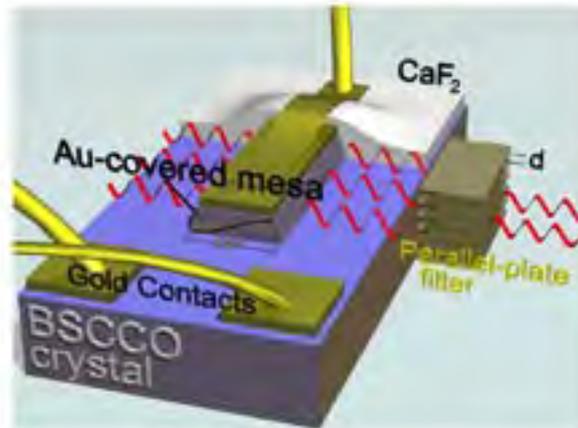
S3-1 Josephson PlasmaによるTHz波発振の理論と実験

東京大学 立木昌

安岡先生からテラヘルツ波の高輝度の発振が必要だという話を伺ったが、最近は今までと全く違う新しい原理で、高輝度の連続テラヘルツレーザー波が発振することが見つかったので、その話をさせて頂きたい。

テラヘルツ波を発振させる装置には半導体デバイスやレーザーなど種々あるが、いずれを採っても1 THz付近で強度が非常に小さくなる。自由電子レーザー装置もあるが、装置が非常に大きくなる。我々に興味があるのは、コンパクトな装置で発振が出来、かつ計測装置も非常に小さいもの。それを目指しているのが私の研究で、具体的には、ビスマス系高温超伝導体を使う。この超伝導体は強い超伝導を持つ銅酸物2層の間に薄い絶縁層を挟んだ構造になっており、これに電圧を掛けるとジョセフソントンネル振動電流が流れる。ナノメートルスケールのジョセフソン接合が1000位重なったものを使う。ジョセフソン電流は、電磁場と非常に強く相互作用するので、ジョセフソンプラズマという新しい電子状態が出来る。普通こういうプラズマはすぐに準粒子へと減衰してしまうが、高温超伝導体ではエネルギーギャップが大きく横プラズマ波はその中に現れるので、励起された横プラズマ波は非常に安定である。横プラズマ波は電磁場波と同じ性質を持っており、その周波数がちょうどテラヘルツ帯にある。したがっ

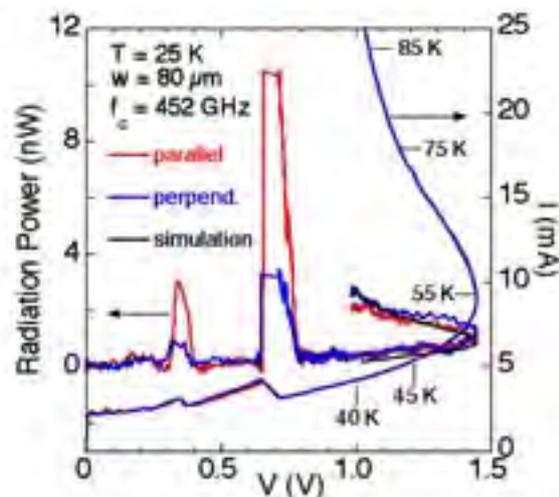
て、何かの機構でこのプラズマを励起できると、電磁場とカップルしてテラヘルツ波を出す強い発振源になると数年前に考えた。



BSCCO Mesa, L.Ozyuzer et.al., Science 318,1291 (2008)

図25

最近アメリカのアルゴンヌ研究所で、図25のようなBSCCOという超伝導体の上にメサ構造を作り、電流を流すと非常に強い発振が出ることが確かめられた。強度が大きい理由は、発振するジョセフソン接合が1000層並ぶからであり、全強度は層数の2乗に比例するので、1000層では106倍になる。したがって図23に示すように非常にシャープなレーザー光が得られる。図はアルゴンヌのデータであるが、最近筑波大学では、強度の強い連続テラヘルツ波が得られており、14高調波までの高調波も観測されている。振動数は0.5THzから3THzあり、高調波が10以上、振動強度は5マイクロワットとなっている。したがって、ジョセフソンプラズマによれば、コヒーレントで非常にシャープな光が20Kから50Kの温度で出せる。カスケードレーザーでは4.2K以下が必要であるので、この温度は魅力的である。



I-V characteristics and emission power

BSCCO Mesa, L.Ozyuzer et.al., Science 318,1291 (2008)

図26

今後の問題は、発振強度をもっと強くするための発振素子の設計と磁場をかけて波長を変え、振動数チューナブルにすること。さらに、同じようなジョセフソン接合を使い、非常にコンパクトな計測器を作ること。

S3-2 超伝導人工原子・マイクロ波単一光子系の量子もつれ計測

NTT物性研 仙場浩一

未来計測の一部として、従来、人類が使ってこなかった量子力学的な重ね合わせや、もつれという量子状態を積極的に利用するデバイスが作れないだろうかという志で研究を行っている。

私達が実験に使っているのは、図のような周上の3カ所にサブミクロンサイズのジョセフソン接合をもつ超伝導体アルミニウムのループで、これが超伝導磁束量子ビットの実体である。量子ビットのすぐ外側にSQUID検出器が配してあり、量子ビット状態の変化に対応して発生する大凡 $10^{-3}\Phi_0$ の磁束の変化を $10^{-5}\Phi_0$ の分解能でSQUID最大超伝導電流の変化や、電圧状態へのスイッチング確率を検出し、量子ビットの状態を計測している。

従来は、非常に多数の量子系集団からの信号の総体が平均値しか測定できなかったが、最近、単一の量子系を実験対象とすることができる時代になってきた。量子ビットの研究は、もともと量子力学的な原子、原子核、イオン等を使うミクロからのアプローチと、半導体の微細加工技術を使いマクロから攻めるというアプローチの

2種類がある。後者の中に、半導体や超伝導回路を使ったものがあり、同じような構造を多数作ることには可能であるが、量子性やコヒーレンスをいかに保持するかが課題である。

原子、あるいは量子ドットでは、1電子の波動関数が重ね合わせ状態等を示したわけだが、我々が使っている超伝導リング（量子ビット）の中には、巨視的な数の電子対（クーパ対）が1つの量子状態に凝縮してサブ μ Aという電流が流れている。この巨視的な数の電子対で形成される電流が量子力学的なコヒーレントな重ね合わせ状態を作り、そのことを検知できるということが最近明らかになってきた。超伝導磁束量子ビットに関しては2004年に証拠が明らかになった。超伝導材料を使えば、電気回路でできたミクロンサイズの人工原子を手に入れられる時代になったのである。その理由をもう少し述べると、真空中にある原子中の電子は離散的なスペクトラムを取り、

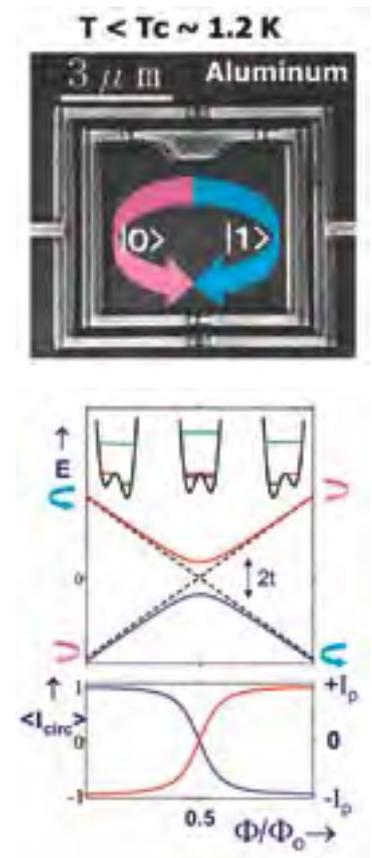


図27

固体中の電子は連続的なスペクトルを取る。超伝導体では超伝導ギャップの中にコレクティブなモードを立てることができるので、固体中でありながら、あたかも真空中の原子に似た長寿命の離散スペクトル状態を作ることができる。エネルギーレベルは、インダクタンス、キャパシタンス、インピーダンス等の回路パラメーターで決まるので、このミクロンサイズの人工原子の特性は、自分たちである程度設計できるのである。

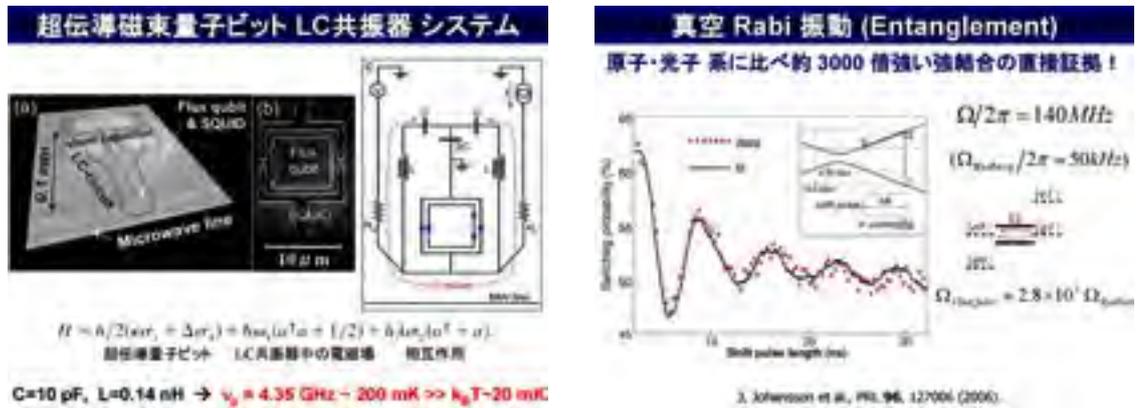


図28

超伝導ギャップ中にLC回路を作れば、その調和振動子に相当するエネルギースペクトルがギャップ中に出来るが、調和振動子の場合にはすべてのエネルギー間隔が等しく、ある特定の量子2準位のマニピュレーションには適さない。そこで、非調和性を持つジョセフソン接合が必要となる。例えばLC回路中にジョセフソン接合を一つ入れると、ジョセフソン接合の持つジョセフソンポテンシャルに起因した適度な非線形性が導入され、ポテンシャルが少し曲がる。これにより、一番下の量子2準位に共鳴するマイクロ波パルスによって量子状態のオペレーションが可能となる。

我々が使っているのは、99年に オランダ デルフト大の Mooij 教授らのグループにより提唱された磁束量子ビットで、アルミニウムのループに3カ所のジョセフソン接合が設けられている。3カ所入れた意味は、ポテンシャルバリアを低くして、実験可能な条件で量子トンネルが起こり易くするためである。すなわち、フラクソイドの量子化という現象によりドーナツ状の超伝導体の中に中途半端な磁場が入った場合には、磁束量子の整数倍になるように超伝導体が自分で表層に超伝導電流を流して、ドーナツの穴の部分を通る磁束の合計を磁束量子(Φ_0)の整数倍にするという性質があるので、その性質を使って、わざと中途半端な $\sim 0.5\Phi_0$ という磁場をかけると、超伝導体が電流を時計方向に流してゼロにするか、反時計方向に流して1磁束量子状態にしようとする。両者のエネルギーは、ほぼ等しくなる。このように、ループにジョセフソン接合を3個入れると電流が反対向きに流れている2つの状態間のエネルギーバリアが低くなり、それらの線形結合がエネルギー固有状態となる。これが量子ビットとしてオペレーションできる1組の量子二準位系である。

上述のことを基に、現在までに Rabi振動や、Ramsey 縞、echo 実験等の 単一量子系としての超伝導量子ビットの量子操作と読み出し、さらに、チップ上で量子ビットに隣接したLC回路中の単一マイクロ波光子との時間領域での量子もつれの制御と観測が可能となり、真空 Rabi 振動数の観測結果より、原子系に比べて数けた強い相互作用を実証することができた。今後、系のコヒーレンス時間を延ばし、量子バス技術など量子計算に本当に必要な技術の展開を目指していきたい。

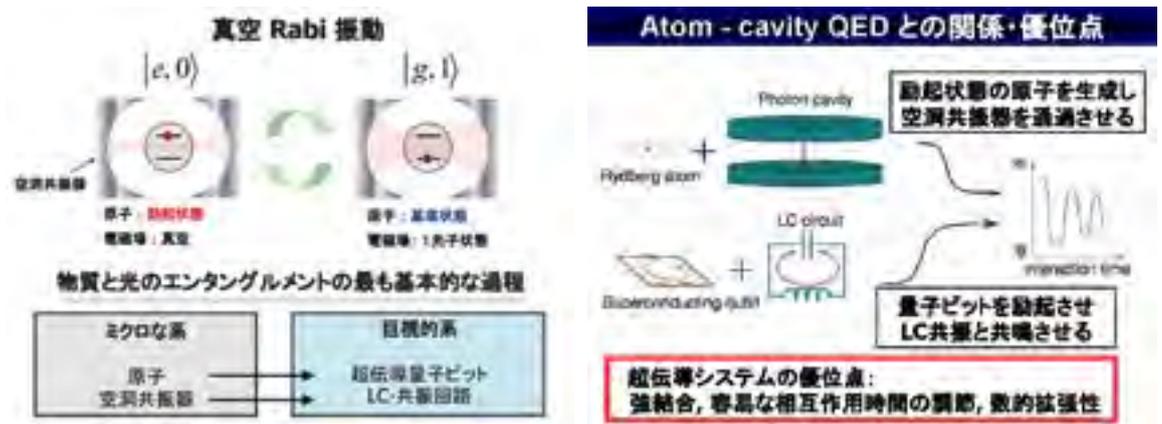


図29

[参考文献]

NTT技術ジャーナル2007年11月号 仙場浩一「超伝導量子ビットと単一光子の量子もつれ制御」

<http://www.ntt.co.jp/journal/0711/files/jn200711018.pdf>

NTT 物性科学基礎研究所 超伝導量子物理研究グループ のホームページの情報をご覧ください

<http://www.brl.ntt.co.jp/group/butsucho-g/index.html>

S3-3 ホトニッククリスタル (PC) の応用利用

横浜国立大学 馬場俊彦

私は、ホトニック結晶を評価するための計測は行っているが、これを計測に利用する研究はしていないので、計測のシーズとしての話を行い、皆さんの御意見を頂きたい。

ホトニック結晶は、周期が光の波長オーダーの1次元、2次元、3次元の周期構造で、その中で光が多次元的なブラッグ散乱などホトニックバンド理論に従う振る舞いをする。ホトニック結晶と類似のものとして、高い屈折率を持つ半導体と空気の組み合わせのように、光を強く制御することも研究されている。

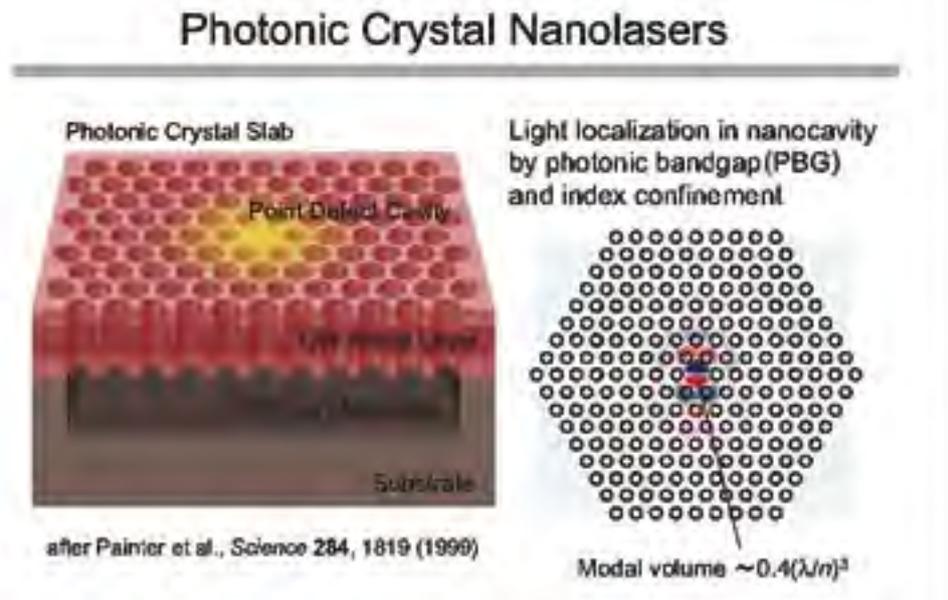


図30

私の研究室は、ホトニック結晶レーザーを研究している。図30のように、半導体の薄い板に周期的な2次元の穴をあけ、一部に穴のない領域を作っておくと、穴のあいだのところは光が存在できなくて、わずかな狭い領域に光が閉じ込められる。この光閉じ込め効果を利用してレーザー発振も出来る。今のところ、世の中にある最も小さなレーザーは、このホトニック結晶レーザーであり、最近、室温での連続発振に成功した。非常にQ値の高い良質なレーザーでシングルモードのスペクトルが出るので、光通信光源として使えると思う。また、空気に露出されているレーザーなので、液体や分子がつけばスペクトルシフトすることを利用したセンサーにもなり得る。これは非常に小さなレーザーなので、1枚のウエハーに多くのレーザーを作ることが出来る。こうした多くのレーザーを一度にセンシングの為に使うというアイデアもある。

ホトニック結晶の中に光の通り道の線欠陥を導入すると、光が線欠陥上を通る導波路となる。関連して、最近、光を止めてしまうスローライトという現象が話題となっている。ようやく光パルスが実際に止まるようになったが、これは時間をコントロールしていることになる。したがって、時間スケールのいろいろな演算ができる。これを通信の光バッファに使える、例えば計測などによく使われる畳み込み積分といった演算が非常に高速にできるようになるので、計測に貢献できると思う。さらに、ホトニック結晶での多次元的な光の回折を利用すると、ユニークな光伝搬を起こさせることができる。例えば光がまっすぐ進むコリメーション現象やレンズ効果、およびブリズム効果などがホトニック結晶の設計によって生み出される。

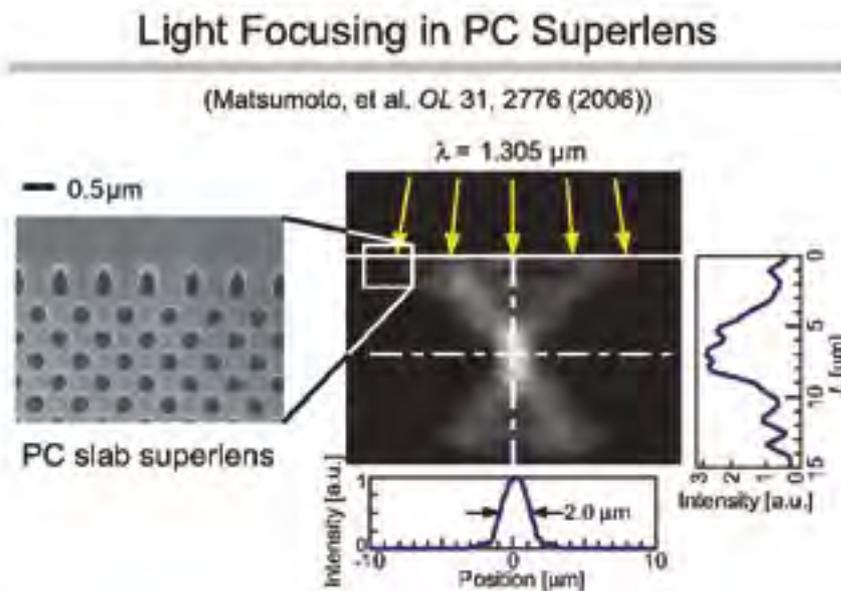


図31

一つの例が、ホトニック結晶においては負の屈折と言われるが、光が入射方角と逆方向に曲がることも生じる。これを拡散光に適用すると、図31のように平たん面で集光するという普通のレンズとは全く違う現象を作り出すことが出来る。さらに、この負の屈折が元になったスーパープリズム現象を利用すれば、非常にコンパクトな分光器ができる。初期的な実験結果としては、全体の大きさは数十ミクロン角という非常に小さなホトニック結晶を作って実際にそういう分光ができた。

今紹介したようなデバイスというのは、シリコンもしくはⅢ-V族半導体の上に作られている。このシリコンホトニクスは、光の分野で大きな話題になっており、インテルやIBMもこの分野に参入してきて、次世代のLSIを速くするために有効であろうと研究開発を行っている。河田先生のプラズモニクスに比べたら大きいですが、従来センチメートルオーダーであったAWG（アレイ導波路回折格子、Arrayed Waveguide Grating）という分波器、もしくはフィルターが非常にコンパクトに100ミクロン角位に小さく収まり、ある程度の性能が得られている。5年後、15年後にはシリコンホトニクスのファクトリーに大規模な光回路やセンサーシステムなどをオーダーできる時代が来るのではないかと、この分野の人たちは期待している。こういったシリコンホトニクスが計測システムの製造形態を大きく変える可能性がある。

S3 ディスカッション（Q：質疑、A：応答、C：コメント）

- C ホトニック結晶とプラズモニックデバイスの関わりについてのコメントだが、プラズモニクスは金属の中で波長が非常に短くなるので、サイズを小さくできるが、

金属の中での光のロスが一番問題で、それをどうやって克服するかということに研究の主眼が置かれている。一方、ホトニクス結晶の方は、サイズはそれほど小さくならないがロスがないので、生体などで、パワーは要らないがコリメーションが必要だというようなアプリケーション、例えば生体内での発光をセンシングしたりするときが必要であろう。2つはそれぞれの長所短所があり、アプリケーションが異なると思う。

- Q NISTがレポートの中で注目しているのは、量子コンピューティングとそれに必要な量子ビットの計測技術である。この方面の日本の研究状況は、アメリカとかヨーロッパ、あるいは中国と比べてどの程度の状況にあるのか。
- A 超伝導量子ビットに関しては、日米欧が3強である。アメリカでは、Yale大学、それから UC Santa Barbara、NISTが強く、ヨーロッパでは、先ほど出てきた Mooij先生のいるDelft工科大、Chalmers、CEA-Saclayが強い。日本ではNECとNTTがコヒーレント動作を確認している。ただし、超伝導量子ビットが半導体やほかの分野の量子ビットに対して明らかな優位性を持っているわけではなく、半導体でもダイヤモンドのNVセンターや、スピン量子ビットなどの面白い動きが出てきている。
- Q アメリカが量子コンピューティングに注目している最大の理由は暗号技術だと思うが、それ以外にどのようなアプリケーションの可能性はあるだろうか。
- A ショアのアルゴリズムの話がされていると思うが、そのアルゴリズムが量子コンピューティングで実用化されるのは、かなり先だろうと言われている。実験室レベルでは数量子ビットがやっと実現できているに過ぎず、今の技術では実現にはほど遠い。他には、光格子中の中性原子やボーズ・アインシュタイン凝縮等を使った量子シミュレーションの可能性があると思う。
- C テラヘルツ分光の将来性については、がん細胞や爆薬の振動数はテラヘルツであるので、テラヘルツ分光でこれらの検出が出来る可能性がある。空港で靴を脱がないですむようになるといった応用が考えられる。また、周波数が高いので、情報輸送量が多くなる。
- C テラヘルツ分光は必ずこの数年の間には物になると思う。既に、物性の測定等には相当役立ってきている。これから先、一般に使われるためには、テラヘルツの発振器や検出器が必要になる。先ほどの立木先生のジョセフソン発振器に期待している。

2.6 セッション4 計測基盤技術の開発

S4-1 マイクロ化学と単一分子計測／分析計測研究開発の課題

東京大学/JST 北森武彦

反応、抽出、蒸留など化学の様々なオペレーションを集積化・デバイス化しよう

試みている。ただ1つのデバイスだけで何かを行うのではなく、これを分析装置、あるいは合成装置の中に組み込んで、初めて機能を持たせる。

そのためには、液体と液体、あるいは液体と気体、固体と液体などを混ぜ合わせ反応させる、溶媒抽出するなどの部品を、並列、直列に結びつけることにより、化学プロセスを小型化し、これをデバイス化して目的の装置の中のセントラルケミカルプロセスユニットとして使うことを考えている。応用としては、医療診断、環境分析、覚醒剤の分析、化粧品や医薬品の合成などがあげられる。例えば、抗がん剤の合成装置では、27枚のチップを並列に並べるマイクロシステムも試作している。



図32

マイクロケミストリでは、普通の1000分の1程度のナノリットル～ピコリットルの物質を扱う。このため、プロセスが高速化できるのが特徴であり、また、体積に比べ面積が非常に大きいため、化学反応を行う上で有利となる。また、並列して処理することで、ハイスループット化あるいはバルク生産なども可能である。

マイクロケミストリを実現するためには、マイクロ～ナノ加工、精密流体制御、バイオプロセスなどの技術に加え、非常に高感度な検出装置も必要となる。例えば、体積が $1 \mu\text{m}^3$ だとすると、この中には0.6分子程度しか含まれておらず、超高感度な検出が不可欠である。1つの有力な手段がレーザー誘起蛍光であるが、残念ながら蛍光分子にしか適用できない。ケミルミネッセンスも有力であるが、単一分子レベルの計測には至っていない。そこで注目しているのが、熱レンズ効果を利用した分光法である。

マイクロチャンネルの中にターゲットとなる分子が1個あったとすると、これにレー

ザーを照射すると、一旦励起状態に移り、やがて基底状態に戻る。その際に放射される熱により屈折率が100万分の1程度低下する。こうして生じた熱レンズによる光の屈折を計測すれば、ここの含まれる分子の個数が求まる。拡張ナノ空間と呼ばれる数百nm程度の空間で計測すれば、ここを通過する分子1個1個をカウントできる。すでに専用の装置を製品化している。



図33

拡張ナノ空間では全く新しい現象も見つかっており、例えば、この中に入れた水は、粘性の高いものになる。このような現象は、バイオロジーにも貢献できる可能性がある。

マイクロケミストリーの分野は、日本とアメリカが競り合いながら世界を先導しているのが現状である。今後、分子認証と分離、検出、インスツルメンテーションが重要となろう。また、ナノバイオ、ナノフォトニクス、MEMSなどの分野との融合も不可欠である。さらに、規格化やインターフェースユーザーの構築が戦略的にも重要となる。

S4-2 ものづくりとリンクした複合計測

Maryland大学/JST 竹内一郎

多元複合計測システムの開発は、ソフトとハードを一体化したシステムエンジニアリングに他ならない。特に、物づくりとリンクした多元複合計測システムの場合、膨大な量のデータをいかにハンドリングするかが大きな問題となる。この問題を解決するための手段として、新しいタイプのデータマネージメントシステムの構築が必要となる。またこういったアクティビティーは、マテリアルインフォマティクスと呼ばれる新しい研究領域の一環として進められている。

材料研究の場合、例え同じ材料でも合成法が異なれば、材料の特性も異なる。また、応用が違えば、物性の評価法も異なる。ここで、ワークフローの迅速化を図るためには、ロボティクス、インフォマティクス、リモートアクセス、インターネット、ウェブを使っ
てのデータアクセスなどが必要となる。

コンビナトリアルアプローチでは、一つのライブラリー上に最大で数千もの組成が異なる材料を合成する。新しいハイスループット評価法も登場してはきているが、未だに評価がボトルネックになっている。最近では、測定インフォマティクスという概念が生まれている。また、データマイニングの重要性が増しており、いかに新しい知識をデータベース化し、それからどのようにして必要な情報を取り出すかという取り組みが、特に企業を中心に進んでいる。



図34

我々も、MATLABとLABVIEWを使った独自のソフトを開発している。また、同ソフトを公開し、計測装置のメーカーに、データ形式の公開と統一を呼びかけている。X線のデータに関しては、日本の複数のグループ（物質・材料研究機構、東大物性研）間でデータの共有化を進めている。

膨大な量の分光及びX線回析のデータから、迅速に新しい知識を引き出す目的で、我々はメトリック・マルチディメンショナル・スケーリングという方法を用いている。すべての回析スペクトラムに関してお互いの類似を表記するマトリックスを作成し、それをまとめてプロットすると、グループ化できるようになる。これにより、異なる組成の試料を、いくつかの構造に分離できる。我々はこの手法を、金属の3元相図に応用している。高速にデータを得る方法として、計算機化学も強力である。実験と計算

との融合が今後の課題である。

ハイスループット評価という観点では、複合計測の実現も重要である。例えば、SPMの一種であるマイクロ波顕微鏡では、誘電率と抵抗が定量的に計測できる。同じ装置を用いて、強磁性共鳴、ESR測定を試みており、これが実現できれば、電気特性と磁性の同時測定が可能となる。

S4-3 アメリカの計測情報技術の最前線

Maryland大学/JST 竹内一郎

欧米では、特にポリマー、触媒のハイスループット開発に力を入れている。

ベルギーのFLAMAC社では、コーティング材料、ポリマー、酸化物材料の開発を手がけている。装置は、データをいかにしてハイスループットに連結するかに主眼をおきデザインされている。FLAMAC社では、まだシステム化されていないが、HTEというベンチャー企業では、システムエンジニアリングの観点から装置の連結を進めている。

複合計測のチャレンジ
ハイスループット スクリーニング
応用例: FLAMAC(コーティング)



	Technique	Measures	Throughput 3 h/day	Availability
組成、膜厚	GDOES	Elemental composition, thickness		Dec 2007
組成、膜厚	Ellipsometry	Thickness, composition	300	X
FTIR	FT Infrared	Chemical Composition, thickness	160	X
光学特性	Visible and Near Infrared	Transmission, Reflection	400	Jul, Nov 2007
電気抵抗	Van Der Pauw resistance	Resistance	400	X
表面エネルギー	Contact angle	Surface Energy	60-400	X
mechanical特性	Nanoindentation	Hardness, Young modulus, scratch resistance		Jul, Dec 2007
X線解析、構造	X-ray diffraction & reflectance	Texture, phase & thickness		End 2007

複合計測のチャレンジ: いかに効率よくデータを連結するか

図35

ノースダコタ州立大では、州の投資により、ポリマー合成を中心にコンビナトリアル研究を進めている。分子量、FTIRスペクトル、表面のエネルギー、DSCデータなどのライブラリー化を進めている。まだ、別々の装置によるフォーマットの異なるデータであるが、その融合化にもチャレンジしている。

シメックス社はコンビナトリアル材料開発野の老舗であり、現在でも最も進んでいる。オラクルをベースにしたソフトウェアを開発しており、四つに分かれている。最

初のライブラリースタジオでは、ライブラリーの設計を行う。例えば、混合粉の組成などを指示できる。次のソフトウェア、インプレッシュニストでは、合成用ロボティクスを扱う。次の部分は計測の制御を担当する。最後のソフトウェア、ポリビューでは、データマイニングを行う（現時点では、ビジュアルイゼーションが中心）。前述のノースダコタ州立大、オランダのダッチポリマーインスティテュートでも、シメックスのシステムを導入している。

触媒に関しては、すでに相当な量のデータが集まっている。無駄を省くため、データを何らかの形で共有できないかについても、検討が始まっている。

ファンディングに関しては、ナショナルサイエンスファンデーション（NSF）の新しいプログラム、サイバーエンネーブルド・ディスカバリー・アンド・イノベーションが、上記データハンドルに関係した研究のこれからの資金源の一部になるのではないかと期待されている。またアメリカでは、最先端の計測技術は軍関連の産業と関わっている。ファンディングエージェンシーとしては、DARPAの他、最近、IARPAが設立された。

S4-4 話題提供

S4-4-1 近接場光学顕微鏡

慶應義塾大学／神奈川科学技術アカデミー 齋木 敏治

近接場光学顕微鏡開発の動機は非常に単純であり、回折限界の壁を打破するために、例えば金属の薄いスクリーンにナノスケールの穴をあけて、その上から光を当てたときに、そのスクリーンの裏側にあけた穴と同じくらいの光のスポットをつくって、これを顕微鏡に使おうというものである。実際には、スクリーンを試料上で動かすのは困難なため、光ファイバーの一端を尖らせ、そこに金属をつけて先端に穴をあけてスクリーンの代わりに利用する。これを試料上で走査することにより、高い空間分解能で光学測定を行う。これは、開口型の近接場光学顕微鏡であるが、鋭い金属針の先端にレーザー光を当て、針の先端に発生する強い局在光を使った散乱型近接場光学顕微鏡も開発されている。

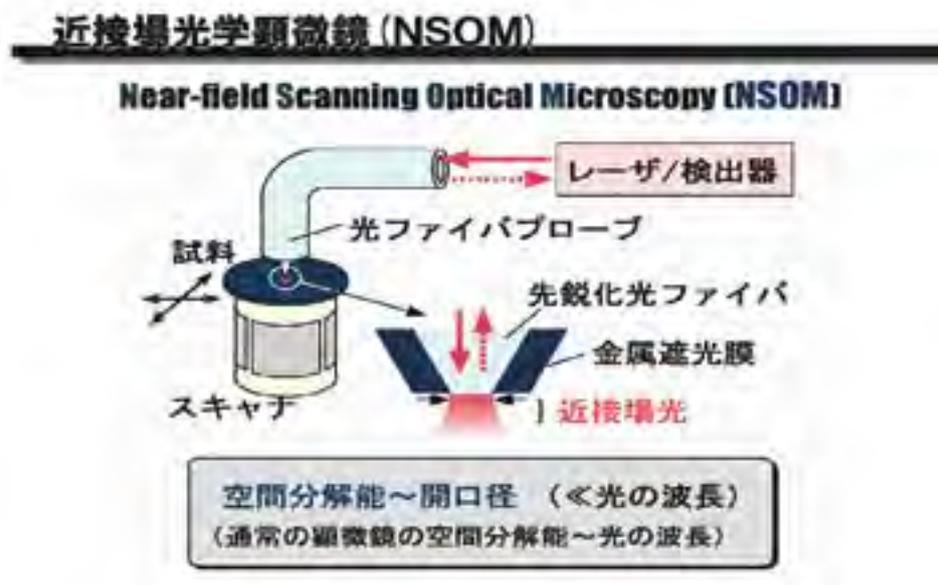


図36

近接場光学顕微鏡の歴史を振り返ると、1984年に、可視光近接場光学顕微鏡が誕生した。その後、92年から94年にかけて、ベル研のベッツィーらによって非常に面白い応用が提示され、それを契機に近接場光学顕微鏡の研究者の人口が増えた。

それとほぼ時期を同じくして、河田先生らにより散乱型近接場光学顕微鏡が、大津先生と私により開口型の近接場光学顕微鏡が開発され、現在の研究のトレンドとなっている。開口型については、世界スタンダードのプロープを日本分光社から販売し、我が国の近接場光学顕微鏡技術の基盤を支えている。

性能の現状は、開口型につきましては、20～30 nmの空間分解能とリーズナブルな測定時間を達成している。散乱型にいても、10～20 nmの空間分解能と、1本のカーボンナノチューブのラマン分光が行える高い感度を持っている。

産業応用上の問題点としては、プロープの個体差によるデータ再現性が不十分である点があげられる。これを解決するには、長期安定的な資金面でのサポートが必要である。また、凹凸構造がもたらす不要なコントラストを低減するなどの工夫も必要である。

新たな展開についてみると、空間分解能はほぼ限界に近づいてきている。これを打開する、新しいメカニズムの採用が望まれる。応用上重要な感度の向上については、アンテナ構造、プラズモニクスをつくった増強などの検討が今後必要となる。

測定波長は、赤外、テラヘルツと、どんどん長い方に向かっている。フェムト秒技術との融合も、歴史は長いですが、今後も技術開発が必要である。

そのほか、新しい測定対象や応用領域の開拓を考えていくべきである。ここで、長期的視野に立った基礎研究が、特に重要である。

S4-4-2 iPS細胞を機軸とした再生医療へ向けた先端計測技術の開発

JST 石井哲也

山中伸弥教授(京大)により見出されたinduced Pluripotent Stem Cell (iPS細胞)は、一度分化した細胞の若返り、すなわちリプログラムし、普通のラボで可能とした汎用性の高い手法である。さらに、従来からあるヒトEmbryonic Stem Cell (ES細胞)が抱えている倫理的な問題を回避し、また再生医療、特に細胞を移植する治療の開発において、免疫拒絶反応がないなどのメリットをもつ。セル誌への発表後の反響も大きく、MITやハーバードで追試や実験動物での治療効果の実証実験が行なわれた。

米国でのファンディングへの対応はすばやく、カリフォルニア州やNIHがファンディングを開始した。JSTでも、今月末にCREST、さきがけによるファンディングを開始する。

再生医療の開発には、いくつかのステップが考えられるが、今後計測等の技術が必要になるのは下図の4と5である。

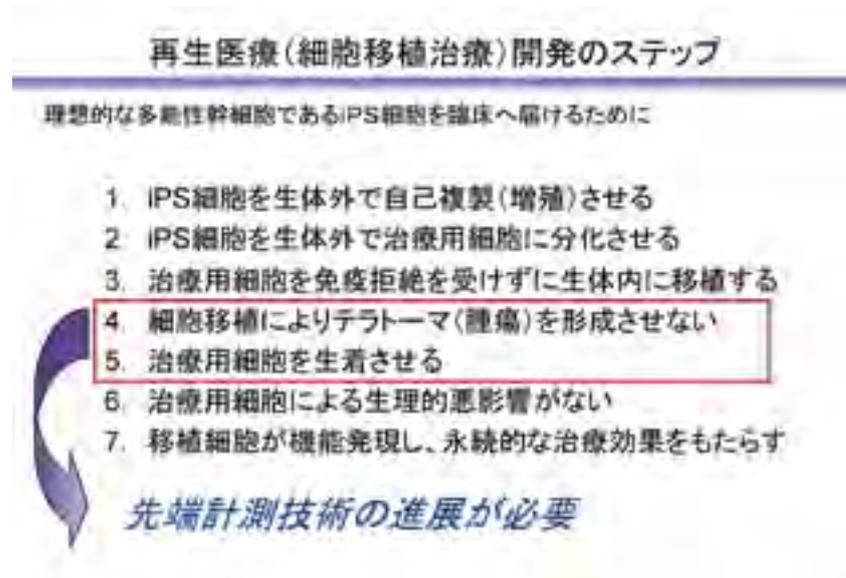


図37

具体的に計測に関連すると思われる例を以下にあげる。細胞を分取するには、フローサイトメーター (FCM) という方法が使われるが、iPS細胞を分化させてそのまま移植すると腫瘍ができる可能性がある。これを防止するには、iPS細胞を完全に除き、治療用細胞だけに純化することが必要であり、FCMの高性能化、すなわち、精密非侵襲のソーティング技術の開発が重要になる。さらに、残存するiPS細胞を検出するというゲーティングの技術も大事である。

このようなテクノロジーは、例えばGMP生産で細胞を大量に増殖する、あるいは選別していくといった産業的を強力に支援する。また、MRI技術の進展も望まれる。実際に臨床試験では、移植細胞が生着したという確認を非侵襲で行う必要がある。しかし、

現在のMRIでは、組織程度の観察しかできない。また特に、膵臓のような臓器の場合観察が難しく、造影剤の開発も必要となる。一方で、高分解能の観察が進むと、インフォマティクスも重要となる。

2.7 総合ディスカッション・イントロダクション

計測・分析支援産業からの問題提起

(株) 東レリサーチセンター 石田 英之

日本の企業における研究開発費は、年間約12兆円が使われており、大学・公的機関の研究開発費を含めると国内における研究開発費の総額は約18兆円／年（2006年）になります。民間企業の12兆円のうち、分析関連費用は大体6%（約7000億円）を占め、その約30%（約2000億円）はアウトソーシングされているという調査結果があります。経済産業省・特定サービス産業実態調査によれば、H15年度の研究開発支援事業は、約2000億円と前回（H12年）の調査に比べ大幅に伸びています。環境分析事業も1700億円くらいあります。日本の分析機器製造産業の規模は意外に小さくて、昨年で4000億円程度です。研究開発支援、環境分析、臨床検査を入れると我が国の分析関連産業は1兆円規模になります。分析支援事業が分析機器の売り上げと同等くらいの規模に成長してきています。その背景として、品質、納期、価格、自前主義からの脱却によるアウトソーシングの増大や分析装置の高度化、高コスト化、それと一番重要なのは高度な分析技術者や熟練した技術者が不足している事等が挙げられます。企業ではローテーションがあるため、なかなか熟練技術者が育ちません。このような背景から、分析支援産業は、単なる外注先から共同開発のパートナーとしての役割を担いつつあります。

先端・基幹産業の現場からの計測・分析のニーズの例を以下に示します：

- ・分析結果の再現性・信頼性（プロセスへのフィードバック、品質管理他）
- ・前処理技術の開発（情報の質的向上、感度・精度向上）
- ・空間分解能・感度の向上（微小領域、極微小試料）
- ・元素から構造情報へ（解析手法の高感度・高空間分解能化）
- ・イメージング（分析結果の視覚化（見える化）、TEM3Dトモグラフィ）
- ・解析ソフトの開発（情報の高度化・解析力向上）

また、先端産業のニーズに寄与する分析技術・分析機器の具体的な開発例として、①極微小物の構造解析、②薄膜の高精度深さ方向解析、③シリコンの微小部の応力解析を紹介します。

極微小有機物の構造解析の分析ニーズは広範な分野で多くあり、欠陥、汚れなどの様々なトラブルに関連した原因解析があります。微小物の元素分析は十分可能ですが、微小有機物の構造解析のが難しいのです。有機物の、例えば1ミクロン立方体は約1ピコグラムですが、サブナノグラム程度の微小物を解析する技術は、顕微赤外や顕微

ラマンという振動分光法以外に有用な手法は今までありませんでした。微小物の質量分析による構造解析が可能な手法として、私どもでは μ -MSという技術を開発しました。図37には俯瞰マップの一つの例かもしれませんが、感度と空間分解能とどれだけ化学的な情報が得られるかという化学情報能を軸にしたマップを示しています。世の中には分析手法がたくさんありますが、極微小物の構造解析ができる手法は限られています。顕微赤外、顕微ラマンを補完する手法として μ -MS (microsampling mass spectrometry)を開発しましたが、まだ空間分解能が不足しています。図37に示す三つの軸を満足する微小部分析の手法として将来有望なのはTOF・SIMSだと思います。

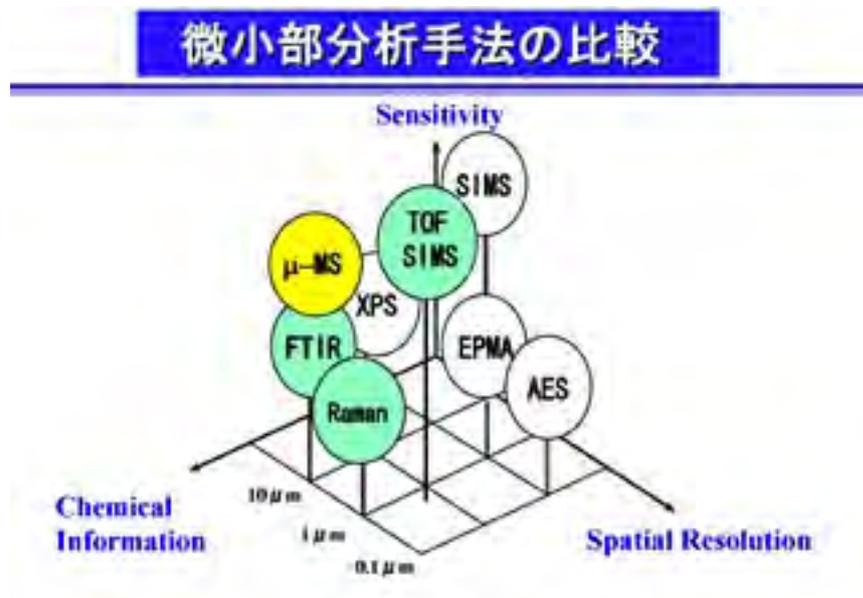


図38

2番目は、薄膜の高精度深さ方向分析の開発例です。深さ方向の元素分析をする方法は、オージェ電子分光、EPMAやSIMS等たくさんありますが、10nmや100nmレベルの表面層について化学構造の分析ができる分析方法はありませんでした。このようなニーズに応えるため、ダイヤモンドの刃で高精度で薄膜を切削する、“Gradient Sharing Preparation”という方法の実用化に取り組んでいます。実際のレジスト薄膜の例ですが、例えば400nmくらいの薄膜を斜め切削しますと400nmの厚みから200 μ mから500 μ mくらいの長さの切削面が得られます。実際に切削面を粗さ計ではかりますと、切削の角度が0.04度くらいになっています。切削面を各種のマイクロプローブ法で分析すれば高精度な深さ方向を分析ができます。これは、いかに計測・分析機器と計測・分析ニーズのインターフェースに前処理技術が必要であることを示す例の一つだと思います。

3番目は、ひずみシリコンというものが現在実用化されようとしており、シリコンにひずみをつけてモビリティを上げています。微小部のひずみを正確にはかること

が必要であり、これまで近接場ラマン分光装置で、実用的なシリコンの歪を正確に計測した例がないため、私どもは、日立ハイテクノロジーと組んで、ひずみと欠陥を光の回折限界以下で同時にはかる新しい装置を開発しています（NEDO委託事業）。

先端デバイス・材料の計測・分析における今後の課題は、以下のようなことだと考えられます：

- ・表面分析技術の進化（マイクロビーム化、高感度化・ハイスループット）
- ・電子顕微鏡の要素技術の進歩（解像度とかEELSの分解能、トモグラフィー、検出器）
- ・SPMの技術の展開（アトムプローブ、分子・原子操作、加工・反応）
- ・ナノ分光分析（近接場分光技術）
放射光の利用（X線のマイクロビーム化、光電子顕微鏡他、XAFS顕微鏡他）



図39

最後に、図39に、数年前に作成したのですが「ナノ分析の今後の展望」ーロードマップを示します。

総合ディスカッション

●計測シーズについて

C 将来的に科学は、自然界域で実在するものをそのまま計測するという方向へ必ず行くと思う。今ある最新の手法に加え、あるがままに物を「見る」という姿勢が大変重要になると思う。現在、真の意味でin vivo、in situで計測分析が可能な技術はラマンである。線形及び非線形のラマン、近接場も含めて日本のラマン技術は非常に高いと思うが、残念ながら産業界レベルでの利用はまだ。つい最近、我々は生細胞中にトランス型の脂肪酸を発見しました。in vivoで見分けられるのはラマンしかないのではと思う。大きな産業基盤を築く必要があると思う。

C ラマンがバイオに使えるとって機器開発の研究者が一生懸命研究しても、実際のマーケットでは、半導体と材料評価分野でラマンは売れ、バイオ分野では日本では殆ど売れていないのが実情。近接場顕微鏡も、バイオ・医療分野になると、マーケットがなかなか新しいものを受け入れる環境にないように感じる。技術があって、装置が開発されても、マーケットにつながらなければ、企業での開発意欲の低下につながる。

医療分野では、その昔、超音波診断装置や、X線CT等が日本へ入ってきた時、超音波の絵が、何が何やらわからないと医者の方から不満が出ていた。ラマンも同様。そのためには、解析技術（ソフト開発）を育てないと成立せず、先行的に標準化できていないと前へ進まない。

C 企業のものづくり現場での立場から言えば、ラマンがダイナミック変化をとらえる有効なツールとして役立つことはわかっているが、一方で開発リスクが大きい。

●産業規模について

C 計測機器の市場は、利用者側の産業規模と利用者のニーズによると思います。例えば日本のバイオ産業では、1兆円っているか程度。臨床マーケットは何十兆円規模。半導体は、電子機器を入れると10兆円を超えて、半導体デバイスで6兆円。半導体は、やはりストレス評価等ができないと、幾らシミュレーションをしても次のステップに行けない。よって、次世代半導体で32ナノとか40ナノのレベルになると、分析計測ができないため品質管理がクリアできず、実用化できない。そういう意味で、シリコンのストレスの評価というのはやはりすごくニーズがあるというところで、産業に直結している。

●シーズとニーズのマッチングについて

C アメリカは、大学が民間のニーズをとらえる努力を一生懸命やっている。ヨーロッパは民間企業が大学に相談に行くから、必然的に大学に民間のテクノロジーの情報が集まっている。日本は、企業が大学に対してきれいなシナリオだけのスタティッ

クな情報しか求めない状況にある。ただ、日本にはテクノロジーがある。要するに団塊の世代が培ってきたテクノロジーを顕在化させる仕事、暗示値を形式化する仕事を団塊の世代の責任として何とかしないといけないという思いがある。そこにテクノロジーの動的計測という形で物を持っていければという思いがある。

- C きちんと産業界の本当のニーズと本当のシーズをまじめに突き合わせ、何がどれだけ大きいかということをやする作業が、ベーシックに必要だと思う。また、キーとなる計測のドライバーが何かということを見出す作業も必要。例えば、電子線関係の技術、組織を見るとか、分布を元素マッピングするとか。最初は多分金属をドライバーとして、金属学会とか鉄鋼業がすごく必要だということで計測が頑張っただけをつくっていく。それをスピルオーバーというか、その技術を使って今度は半導体産業が勃興した経緯から、半導体産業がまさにその技術を使い、主従が逆転し、今度は半導体産業がある部分の計測のドライバーになった。それでFIBができ、断面TEMが見えたり、EELSが伸びたり、いろいろな形で半導体が伸びている。

また、高付加価値の鉄鋼で、今度はそれがテクノロジードライバーになるのではないかという予感がする。例えば半導体産業で必要とされるドーピングプロファイルの濃度と、それから鉄鋼業界が必要としている不純物の濃度は、はるかに鉄鋼業界の方でレベルが高いということと、それから一けた上がればもっといいことがある。このように、様々な計測の諸技術に対してテクノロジードライバーなるものを探す。見えているテクノロジードライバーではなく、本当にポテンシャルのあるテクノロジードライバーを見つけるのはニーズ側とシーズ側の人々が本当に懸命に話し合わないとは出てこないのではないかという気がする。例えば、半導体のムーアの法則、半導体ロードマップがあればほど強力な理由は、経済原理が根底にあるから。物事を小さくしていくと、ビットコストがどんどん下がり経済的に成立する。また、機能を小さくすればスケールリングで速くなるし、エネルギー消費が少なくなる。

- C 日本の分析機器メーカー（外国の代理店含む）の営業は、企業のニーズをつかみ、わかっているが、現実的にそれに応えるシーズがないという状況。アメリカ等は、インターフェースがしっかりしている。日本はインターフェースが少なく、インターフェースをどのくらいにしていくかということが重要。
- C 当たり前だが、ニーズ・シーズ論で、生産現場で何が問題になっているかというのは企業秘密。そうすると、企業に求められることは、幾つかある具体的なニーズを抽象化・一般化し、言ってもらうことが重要。
- C 現象ごとの個別シーズの話になると、たくさんのもうかるような大量の先端計測機器ではなくなりベンチャー対応になるかと。そうしたとき、どういう形で先端計測的な、少人数でもいいから技術が蓄えられていく仕組みをつくるのか。
- C アメリカの質量分析学会は、数千人規模の非常に大きな学会で4日間くらい行われます。1日当たり600件くらいの発表があり、野球ができるくらいの会場に、その

ポスターの周りが全部企業など、あるいは大学のベンチャーというところが全部囲んでいます。その距離はたった数メートルしかない。そういうところで、例えば人買いをやったり、あるいは新しい発表を見て、一緒に企業としてやりましょうとか、そういうことがごく当たり前のように行われていた。逆にアメリカがそれではあまりにも近過ぎて、その弊害を考えないといけない状況になっているようだが、日本はまだまだと感じました。そのようなシステムづくりは、垣根を低くする一つの方法ではないかと思う。

- C アメリカと日本では、軍事予算が大きな違いです。DARPAでやった軍事研究の成果が、最終的には現在産業で使われている例が多い。例えば、先日陸軍のファンディングの会議へ行ったところ、サイエンスフィクションの映画を出して、「こんなものをつくって下さい」という。そういうことをやることで、部分的に成功するテクノロジーが出てくるようになる。そういう意味で、リスク（クレイジー）な研究をやる機会を与え、研究者生命を担保することは重要。
- C 大学人としては高いレベルの企業ニーズに応じた研究をしたい。例えばほかの企業はやっていないけれども、これを事業化したら非常に大きなものができるというような高いレベルのニーズというのは、まだ余り産業界から出ているという感じがしない。
- Q 分析機器工業会も企業と大学の接点になり得る活動をしているのではないか。
- A 今一番気にしているのは燃料電池やエネルギー関係の分析の話だが、まずこの辺の話は、企業から話を聞くことができない。受託分析メーカーもほとんど秘密保持契約を結びユーザーとやっており、当然今開発でしのぎを削っているところは、今一番肝心なところ。

ニーズというのは多分二つあり、一つは新しいものをつくるためにどうするかというニーズ。それから、大体プラザ合意があった1987年くらいから、あの前は、実は割に円安だったので、分析機器メーカーはみんな景気がよく、田中さんがノーベル賞をとったような基礎研究にお金を使う余裕があった。ところが、プラザ合意の後、経営が悪化し、なお且つグローバル化でリターン・オブ・イクイプメントのようなものが求められるようになり、ますます研究費も減らされた状況。分析企業の場合には、グローバル化による悪影響というか、なかなか企業としてはそのようにはいかないという状況がある。

●プロトタイプ実用化について

- C 機器開発は、装置・プロトタイプをつくった後が大事。プロトタイプができました、論文を書きました、研究期間が終わりました、お金が出なくなりましたからそれでおしまい。これがほとんどの装置づくりの今までの事業の実態ではないかと思う。それをさらに性能を実証し、世の中の役に立つということをデータで示す。日本発

のオリジナルな技術と装置ができたならば、その実績をきちんと世の中に示せる形でアドバンテージを確保した上でオープンにすると、そうでなければ真の日本の科学技術のかさ上げになっていない。

本論に戻るが、このような問題点をクリアするため、JST先端計測分析技術機器開発の事業の第3ステップに、プロトタイプ実証実用化プログラムがまもなく公募を開始する。これは、プロトタイプまで来てすばらしい性能を持っているが、それを本当にユーザーとして立派な方々がそれを使い、もうちょっとこのように直してくれとか、これはソフトが甘いではないかというようなものを全部組み込んで、そして、それを製品として販売するという三位一体のような形で一遍製品化への道筋を立ち上げてみてはどうかという、ある意味では日本で今までなかった事業。それを活用しながら、計測バリアを超え、新しい展開を目指していきたい。

- C プロトタイプ新事業の画期的な事の一つは、日本の国がつくった機器を海外のユーザーが利用するという点も辞さない点。何事もオンリーワンで世界初だとすると実績がない。実績がないと買わないという悪循環だが、もう1回フィードバックループをつくり、データのn数をふやすというような形で実績をつくれれば、それで波及効果が出る。

Appendix

Appendix 1: 事前アンケート

本ワークショップ開催にあたり、事前に参加者の意見を整理し、当日の議論の資料とするために以下のQ1からQ10の内容のアンケートを行った。またアンケート結果を整理し、一覧表とした。

アンケート内容：

A. イノベーションを誘発するための方策について

Q1. イノベーションファクター

産業にイノベーションを誘発するためには如何なる進歩が、計測・分析技術に必要と思われるかについてお答え下さい。ご自身が研究開発に従事される代表的な技術分野、あるいは特に興味がある技術分野を一つ取り上げ、その名称（技術／機器名）を下欄にご記入頂き、進歩・改善を目指した項目で近いと思われるものを以下より選択・記載して下さい（複数選択可）。また、進歩・改善項目について、定量的な目標（空間分解能、時間分解能、試料ボリューム、等）があれば、下欄に「現状値」および「目標値」をご記入下さい。

計測・分析技術名：

- | | | |
|----------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> 信頼性向上 | <input type="checkbox"/> 複合化 | <input type="checkbox"/> 低コスト |
| <input type="checkbox"/> 高感度化 | <input type="checkbox"/> 高速化（試料調整） | <input type="checkbox"/> 互換性向上 |
| <input type="checkbox"/> 多元化（マルチチャンネル） | <input type="checkbox"/> 高速化（データ収集） | <input type="checkbox"/> 接続性向上 |
| <input type="checkbox"/> 多元化（マルチスケール） | <input type="checkbox"/> 高速化（試料解析） | <input type="checkbox"/> 小型化 |
| <input type="checkbox"/> タフネス化 | <input type="checkbox"/> 簡便化 | <input type="checkbox"/> 新科学原理の応用(例:ナノ計測等) |
| <input type="checkbox"/> その他（ ） | | |

現状値：
目標値：

Q2. タイムスケール

Q1で挙げられた技術課題の達成は、下記のどのタイムスケールに対応すると思われますか？また、その理由について、可能な範囲で具体的にご記入下さい。

- 達成間近
 5年以内
 5～20年
 20年以上

理由：

Q3. 国際的位置づけ①

Q1に挙げられた計測・分析技術について、我が国は、

- | | | |
|-------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| <input type="checkbox"/> 世界をリードしている | <input type="checkbox"/> 欧米と同レベル | <input type="checkbox"/> 米国と同レベル |
| <input type="checkbox"/> 欧米より劣る | <input type="checkbox"/> その他（ ） | |

Q4. 国際的位置づけ②

Q3の回答について、競争相手である欧米諸国の代表的な機関名と具体的な技術についてご記入下さい。

米国： 技術： 欧州： 技術：

Q5. 研究開発、技術展開、社会普及における国際競争力確保に関する主要因子

以下の項目について、主要因子として重要だと思われるものを以下より選択・記載して下さい（複数選択可）。また、選択頂いた項目について、その効果、実施方法等についてご意見があれば記載願います。

- | | | |
|-------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|
| <input type="checkbox"/> 施策（税制、調達） | <input type="checkbox"/> 研究開発資金援助 | <input type="checkbox"/> 人材育成 |
| <input type="checkbox"/> 国際連携 | <input type="checkbox"/> 基礎研究 | <input type="checkbox"/> 異分野融合 |
| <input type="checkbox"/> シーズとニーズの交流 | <input type="checkbox"/> その他（ ） | |

実施方策等ご提案：

Q6. 「科学シーズと産業ニーズをつなぐ先端計測」の課題設定について

医学分野では、基礎医学、疫学の基礎研究から臨床医療までの経路に、分断された専門分野、人材交流、法的規制等の多くの問題があり、これらのバリアを低減し基礎から応用への展開をスムーズにするため、Translational Research というコンセプトの戦略研究が始まっています。法的規制の問題は医学ほど大きくはないとしても、基礎と応用（産業）をスムーズに連携するための技術的、人的、資金的、社会的問題は先端計測の分野でも重要と考えます。

今回のワークショップでは、“Translational Measurement Research” という分野の開拓も視野に入れていきます。この視点に関する妥当性、ご意見を以下の欄、または当日のご発表、全体討論に反映させていただけると幸いです。

”Translational Measurement Research (TMR)” のコンセプトについて、

- 賛同する
 賛同しない
 どちらともいえない

また、コンセプトを具体化するとしたら、どのような課題が必要だと考えますか？

課題：

（課題の例）（例1）TEMの高解像化と長年の収差補正基礎研究、（例2）情報新産業創出へのQbit計測、（例3）ナノテク産業化に備えたナノ材料の危険性評価

参考（ご自身のご専門分野について）

Q7. 研究/産業分野

ご自身が従事される計測・分析研究開発の出口は、どの産業分野に属しますか。なお、基礎研究

を指向されている場合は、当該研究成果がどの産業分野へ貢献できると想定されるかお答えください（複数選択可）。

- | | | |
|-----------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> 建築・構造物 | <input type="checkbox"/> ITソフトウェア | <input type="checkbox"/> 材料 |
| <input type="checkbox"/> 化学 | <input type="checkbox"/> エレクトロニクス | <input type="checkbox"/> ナノテクノロジー |
| <input type="checkbox"/> 安全・安心 | <input type="checkbox"/> エネルギー | <input type="checkbox"/> 食品・農林水産 |
| <input type="checkbox"/> 機械 | <input type="checkbox"/> 環境 | <input type="checkbox"/> 生活（娯楽・スポーツ） |
| <input type="checkbox"/> ITハードウェア | <input type="checkbox"/> 医薬医療／バイオテクノロジー | <input type="checkbox"/> その他 |

Q8. 計測・分析対象

Q7についてご自身の計測・分析対象／現象は、具体的にどのようなものですか（複数回答可）。

課題：

例： エアロゾルの組成、燃料電池における水素イオンの挙動、タンパク質の構造、など

Q9. 計測・分析セクター

ご自身の研究開発テーマ（技術）は、どの計測・分析セクターに属しますか。近いと思われるものを選択して下さい（複数選択可）。

前処理	<input type="checkbox"/> 薄膜・表面加工	電磁波・励起ビーム	<input type="checkbox"/> SR光	分離分析	<input type="checkbox"/> クロマトグラフィー
	<input type="checkbox"/> 抽出・濃縮		<input type="checkbox"/> テラヘルツ光		<input type="checkbox"/> 膜・フィルター
近接プローブ	<input type="checkbox"/> ラベリング	<input type="checkbox"/> 赤外・ラマン光	<input type="checkbox"/> 可視・紫外光	<input type="checkbox"/> 遠心分離	<input type="checkbox"/> 抽出・蒸留
	<input type="checkbox"/> 溶解	<input type="checkbox"/> 可視・紫外光	<input type="checkbox"/> X線	<input type="checkbox"/> 質量分析	<input type="checkbox"/> 電気泳動
	<input type="checkbox"/> その他	<input type="checkbox"/> X線	<input type="checkbox"/> ガンマ線	<input type="checkbox"/> 磁選	<input type="checkbox"/> 磁選
	<input type="checkbox"/> 電場	<input type="checkbox"/> ガンマ線	<input type="checkbox"/> レーザ	<input type="checkbox"/> 遠心分離	<input type="checkbox"/> 熱分析
	<input type="checkbox"/> 磁場	<input type="checkbox"/> レーザ	<input type="checkbox"/> 電子線	<input type="checkbox"/> その他	<input type="checkbox"/> センサ・デバイス
	<input type="checkbox"/> マイクロ波	<input type="checkbox"/> 電子線	<input type="checkbox"/> 陽電子線	<input type="checkbox"/> ソフト（ソフトウェア、インターフェイス）	<input type="checkbox"/> 標準品（物質、試料、試薬）
	<input type="checkbox"/> 電磁波（光）	<input type="checkbox"/> 陽電子線	<input type="checkbox"/> 中性子線	<input type="checkbox"/> その他（ハイブリッド化等）	
	<input type="checkbox"/> 力	<input type="checkbox"/> 中性子線	<input type="checkbox"/> イオン線		
	<input type="checkbox"/> 熱	<input type="checkbox"/> イオン線	<input type="checkbox"/> プラズマ・ICP		
	<input type="checkbox"/> イオン	<input type="checkbox"/> プラズマ・ICP	<input type="checkbox"/> 音波・超音波		
<input type="checkbox"/> 複	<input type="checkbox"/> 音波・超音波	<input type="checkbox"/> その他			
<input type="checkbox"/> その他	<input type="checkbox"/> その他				

Q10. 関連する主な研究開発目的／産業プロセス

ご自身が従事される（従事された）計測・分析開発にかかる、主な研究開発目的、あるいは産業プロセスはどれですか。近いと思われるものを選択・記載して下さい（複数選択可）。

- | | |
|------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> 現象発見・解明／発見・科学的知識のストック | <input type="checkbox"/> 現象発見・解明／概念証明 |
| <input type="checkbox"/> プロセス改善／設計 | <input type="checkbox"/> プロセス改善／プロトタイプ製作 |
| <input type="checkbox"/> 品質・性能保障／工程管理 | <input type="checkbox"/> 品質・性能保障／品質管理・性能評価 |
| <input type="checkbox"/> その他（ ） | |

Q11. その他自由コメント (if any)

コメント：

以上、ご協力有難うございました。

●アンケート結果

計測・分析セクター	Q1. イノベーションファクター			
	計測・分析技術名	進歩・改善を目指した項目	現状値	目標値
近接プローブ	原子間力顕微鏡 (AFM)	複合化、高感度化、高速化 (データ収集)、簡便化、新科学原理の応用	1. 現状値: 水平空間分解能 (原子識別・操作・組立への応用) 現状値: 垂直空間分解能 (原子識別・操作・組立への応用) 2. 現状値: 時間分解能 (ナノスケールのダイナミクス、特に蛋白質等の溶液中ダイナミクス応用)	目標値: 1pm (真空中) 目標値: 0.1pm (真空中) 目標値: 10msec以下 (原子分解能、液中/ガス中/真空中)
近接プローブ	近接場光学顕微鏡	信頼性向上、高感度化、新科学原理の応用	20~30 nm	10 nm (高い再現性を要求)
近接プローブ	3次元アトムプローブ	高速化 (試料調整)、簡便化	針状試料作製に時間と労力が必要・電界応力による試料破壊の頻発	試料作製法のルーチン化、レーザー補助による試料破壊頻度の低減
電磁波・励起ビーム	電子顕微鏡	複合化、低コスト、高感度化、高速化 (試料調達)、高速化 (データ収集)、タフネス化、簡便化	TEMの元素分析用特性X線のエネルギー分解能が130eV程度/TEMの球面収差補正技術に目処がついた	10eV以下の高エネルギー分解能の実現/TEMの色収差補正も同時に満足できる技術開発
電磁波・励起ビーム	テラヘルツ計測	高感度化、高速化 (データ収集、試料解析)、小型化、簡便化		
電磁波・励起ビーム	テラヘルツ 電磁波発振と計測	小型化、新科学原理の応用	0.5THz-3THz (テラヘルツ波の振動数)	0.5THz-5THz
電磁波・励起ビーム	短期(5年)には 赤外/ラマン分光 (赤外自由電子レーザー分光、多角入射分解分光、ATR法、増強ラマン分光、など) およびテラヘルツ分光、和周波分光など/長期 (20年) には テラヘルツ分光を含む電磁波のすべてから超音波までを含む振動分光の、「マルチスケールスペクトロスコピー」の実現を期待する。	複合化、高感度化、多元化 (マルチスケール)、高速化 (データ収集)、高速化 (試料解析)、小型化、タフネス化、その他1 (スペクトルの微細な時間軸変化の高精度検出)、その他2 (三次元空間マッピング)、その他3 (空間分布情報の時間軸変化の高速検出)	平面分解能~1mm>薄層の厚み方向分解能~10nm 時間分解能~1sec	薄層の厚み方向分解能 1nm ~100µm かつ 時間分解能 0.1 msec +マッピング機能
電磁波・励起ビーム	X線分析	複合化、低コスト、高感度化、小型化、新科学原理の応用	装置の規模に依存する	ハンディー装置でも大型装置に匹敵する性能
電磁波・励起ビーム	イオンビーム分析	複合化、高速化 (試料解析)		
電磁波・励起ビーム	ナノTOF-SIMS		空間分解能 1-2µm	空間分解能 100 nm レベル
電磁波・励起ビーム / 分離分析	質量分析	信頼性向上、低コスト、高感度化、小型化、簡便化、その他 (ソフトウェア、分解能)		
電磁波・励起ビーム (その他)	X線回折法において用いられる高速1次元検出器 商品名 D/tex Ultra	信頼性向上、低コスト、高感度化、交換性向上、多元化 (マルチチャンネル)、高速化 (データ収集)、高速化 (試料解析)、簡便化	計測率 100万cps エネルギー分解能 20% 以下	計測率: 100万cps エネルギー分解能 40% 以下
その他 (検出)	光サンプリングオシロスコープ、単一光子カウンター / 赤外カメラ、単一分子・化学分析	高感度化、高速化 (データ収集)、多元化 (マルチスケール)、小型化		
分離分析	高速液体クロマトグラフィー (HPLC) の製品開発 (S-1)	高速化 (試料解析)	代表的な高速分析時間 50s	代表的な高速分析時間 5s
分離分析	超高速DNAシーケンサー (ナノポアシーケンサー)	低コスト、高感度化、高速化 (データ収集)、簡便化、新科学原理の応用		1000ドル ヒト遺伝子解析実現
分離分析	µケミストリー (液クロの送液部、分離部、検出部等を一体化したイメージのµ分離分析装置ないし類似の装置システムを想定した場合)	信頼性向上、低コスト、簡便化	µシステムを構成する部品に規格が無く、モジュール化もされていない。システムの構成が研究者によってバラバラで互換性もない。よって、システム構成にあたり連結部の標準化が決定的に不備。連結に当たって個人的な能力差が大きい。	規格化、モジュール化を世界的に進め、構成したシステム性能に個人差が入らないようにする。
その他 (システム)	機能酸化物薄膜における酸素欠損の定量化	高感度化、新科学原理の応用	現在directに計れる方法はほとんど存在しない。	stoichiometric formulaの5~10%ぐらいで感知できないか
その他 (システム)	生成物のその場分析・同定が可能なナノ材料 (粒子) 合成システム	複合化、高速化 (試料調整、データ収集、試料解析)、簡便化		
その他 (システム)	生体情報の遠隔・常時計測と送信システム (医療機関に向かずとも心拍数、呼吸音、血圧その他の非侵襲的な測定項目等の計測により日常の健康状態を把握し、直ちに医療機関に電送可能な小型携帯機器)	複合化、低コスト、高感度化、小型化、簡便化		

Q2. タイムスケール		Q3. 国際的位置づけ①	Q4. 国際的位置づけ②	
	理由		米国	技術
5年以内	1.5年以内で実現しないと価値が激減する 2.金沢大学の安藤教授のグループがかなり良い所に来ている	世界をリードしている	IBM Almaden Dr.Heinrichグループ (旧Eiglerグループ)	極低温AFM
5~20年	研究者人口が多いとは言い難く、競争が十分におこなわれていない。研究者人口が少ない理由の一つとして、地道な装置開発、性能向上は評価されにくく、現場の研究者にとってモチベーションが高まらないことが挙げられる。	世界をリードしている	ロチェスター大学	散乱型近接場光学顕微鏡
5年以内	FIB微細加工法の進展とレーザアシストイオン化の最適条件探索	欧米と同レベル	Imago Scientific, Oak Ridge National Lab	Local Electrode Atom Probe
5年以内	電子顕微鏡の要素技術開発として、マイクロカロリメトリEDS法が検討され、TEMへの実用装着のための技術立証の段階に進んでいる。また収差補正技術がドイツで開発され、その後、世界中で色収差補正技術開発が競合状態にある。	欧米と同レベル	TEAM プロジェクト	色収差補正や5次以上の球面収差補正技術を開発中。
5~20年	食品検査や現在進められている郵便物検査システム等身近なテラヘルツ計測の実用化は5年以内に行われると考えられるが、医薬医療への応用に関してはデータベースの確立等いろいろ解決しなければならない問題があり、目標達成のためには5~20年は要する。	欧米より劣る もしくは、 欧米と同レベル	Rensselaer Poly- technic Institute	イメージング技術、 安全・安心への応用 技術
5~20年	新しい機構によるレーザーテラヘルツ波の発振に成功したところなので、医学等に活用できるまでの技術達成には数年が必要と思われる。	世界をリードしている	ALO 国立研究所	テラヘルツ波発振素 子作成とテラヘルツ 波測定技術
5~20年	界面近傍のみの増強スペクトルの1msecオーダーの時間軸解析は3年以内に達成可能。100μmまでのナノ〜マクロに至るダイミックスレンジを保ちながら、0.1msecの時間分解能が達成されるのは5年以上掛かる。20年後には最低でもpsecオーダーの時間分解能と安定性を保ちながら、現場のナノからマクロに至る表面・バルク・界面の相構造の発展が~0.1nmから100μmまでリアルタイムに把握できるようにすべきと考える。	その他(1msecの時間分解能ニーズに向けた技術開発は欧米でも日本でも進んでいない)	Aspectrics社 Axsun instruments社	光ディスク回転干渉 型FTIR (現場安定性、 0.1msec時間分解能 の可能性) MEMSセンサー搭載 ラマン分光 (対環境、 時間軸安定性)
5年以内	ミニクロトロンを利用を除けば、部分的に実現しつつあるため	世界をリードしている	NIST、 ロスアラモス研	X線分析用 光学装置
5年以内	イオンビーム分析とXPSの複合化による化学状態も含めた深さ方向分析に関しては、基礎的な部分の検討が進んでいるが、実際に複合装置の設計・製作と実証に数年が必要。	欧米と同レベル	ALIS Corporation	高輝度ナノビーム用 イオン源
5年以内	一次イオンビームのマイクロビーム化、二次イオンの検出感度の向上	欧米より劣る	アルバックファイ	
20年以上	新しい装置ができれば新しいアプリケーションが切り開かれ、また新しいアプリケーションに用いようとする新しい装置開発が必要となり、いつまでも終わることはないと考えられる。	その他(大学レベルでの装置開発では世界をリードしている部分もあるが、企業の技術は劣っている。近年の質量分析装置は(他の分析装置も同様と思われるが)フラット化され、ソフトウェアの締め付けが厳格になっている。しかし日本はソフトウェア/開発も含めたソフトウェアが弱い。)	Purdue University, Johns Hopkins University, Florida State University, Vanderbilt University School of Medicineなど	イオントラップ、 飛行時間型、 FT-ICRMS、 イメージング質量分 析など
	丁度 完成したてで数ヶ月になる。競合他社より送れること4年以上 5年以上の計画は 空間分解能が高く、計数効率の良い、大面積の2次元検出器の開発	欧米より劣る		
達成間近、 5年以内、 5~20年	デジタル技術の進歩で1ps以下が評価できるサンプリングは可能になりつつある。単一光子を光通信帯で観測することも同様。CO2等の化学物質の排出を可視化するカメラはプロトタイプはできている。フォトリソグラフィによる微小分析は今後の展開	世界をリードしている 欧米より劣る	ロチェスター大、MRI-ラボ、 大、ニューメキシコ大など (DARPAの助成を受けている機関)	赤外カメラ、 単一分子・化学分析
5~20年	液体クロマトグラフィーの過去50年間を俯瞰すると15年間当りおよそ1桁の高速化がなされてきたため	欧米より劣る	Waters社、Agilent社	超高速液体クロマト グラフィー (UPLC)、 マイクロチップ
	ナノボア形成技術の構築とDNA塩基認識計測技術の構築のための開発研究が必要。半導体微細加工技術を更に高度化し、電気的(電気化学的)計測技術も高度化が必要。	欧米より劣る 世界的に各種シーケンス方式の検討がなされているが、ナノボア方式については日本での研究開発体制が大幅に遅れている。取組構想がある機関は日本で1~2カ所?	Harvard University, Stanford University, University of Illinois 等	
5年以内	5年以内に達成できなければμケミストリー自体の独自アイデンティティの確立ができなくなり、その技術の系統的・組織的な実用化が困難になる。	欧米と同レベル	ハーバード大	μフルイデックス
5~20年	特に試料上酸素欠損の空間マッピングができるようになるまでには全くの新しい技術の開発が必要であろう。現在のところ、逆に薄膜作成の時点でいかに酸素量をコントロールできるかということがstate-of-the-artである。	世界をリードしている	上に述べたように直接 測れる技術はほとんど 存在しない。酸素量を 制御しながら膜の作 成という面からだと、 Penn StateのMBEのグ ループが進んでいる。	
5~20年	必要な要素技術はある程度そろっていると考えられる。しかし、ナノ粒子に適切に対応するための分析法、分析試料の前処理、スケールアップ(合成速度の向上→分析速度・スループットの向上)など、必要に応じた開発が必要である。	欧米と同レベル 米国と同レベル	カリフォルニア大 (バークレー)	マイクロアタカを使ったin- situ解析を行いながら の粒子合成
5年以内	この機器を利用する緊急性が社会にどの程度あるかについて、よく分からない。しかし要素技術面では、5年程度で対応できそうに思われる。			

Q 4. 国際的位置づけ②		Q 5. 国際競争力確保に関する主要因子	
欧州	技術		実施方策等ご提案
University of Regensburg Prof. Dr. F. J. Giessibl グループ	水晶振動子AFM	研究開発資金援助、人材育成、基礎研究、異分野融合	予算の集中投資、博士研究員・博士学生への給料付与
マックスプランク研究所、スイス連邦工科大学	赤外近接場光学顕微鏡、低温近接場光学顕微鏡	研究開発資金援助、人材育成、基礎研究、異分野融合	根気の必要な基礎研究のためには、少額でよいので長期継続的な資金援助が必要である。研究評価の多様化や異分野からのニーズ発掘などによるモチベーションの向上も必須である。
University of Rouen	Laser Assisted Wide Angle Tomographic Atom Probe	研究開発資金援助、人材育成、異分野融合、シーズとニーズの交流	これまで組織化されなかったアトムプローブ分析従事者の学会活動を通しての横の繋がりの強化、他の分析手法の研究者との交流
CEOS社、	収差補正ユニットの開発。	施策（税制、調達）、研究開発資金援助、人材育成、国際連携、異分野融合	（施策、研究開発資金援助）先端計測技術開発は、産業としてはベンチャー企業規模が重要かと思います。投資リスクが大きすぎてベンチャー企業を支援できる税制や研究開発資金援助の仕組みが必要かと思います。 （人材育成、異分野融合）産学官やそれぞれの研究部門での壁を越えた、個人レベルでの研究者間の連携が少なすぎるように感じます。ネット社会が発展する中で、壁を越えた研究者間の交流や共同研究が増えるような制度作り、環境作りも必要かと考えます。
英国：Tera View	医薬医療／バイオテクノロジー関連技術	研究開発資金援助、人材育成、基礎研究、シーズとニーズの交流	
		研究開発資金援助、国際連携、基礎研究	テラヘルツ波開発の基礎研究に関しては、国際連携研究が必要
Bruker社	ラマン分光、テラヘルツ分光	施策（税制、調達）、人材育成、異分野融合、シーズとニーズの交流、その他1（細分化・高度化しがつ増大するデータをキーハースンが即断できるデータ翻訳機能）、その他2（ものづくりの実環境に近い雰囲気とエネルギー投射のできる「試料室環境制御技術」）、その他3（知的財産権確保への動的計測法の活用促進）	1. 次世代がモノとキャッチボールしながらナノレベルからの声と対話できる「動的計測」の開発により次世代の感性を育み、ナノからマクロまでを俯瞰できる科学人材を育成する（人材育成） 2. 開発資源が集中するバイオ計測技術を最終目標とせず、これをシーズ源としてナノプロセスの動的計測技術開発に向けて先行着手する必要がある（異分野融合の意識的促進） 3. 研究しない製造現場プロセスのリアルタイム計測機器の開発により、産業界に提示しているニーズを科学的に解明して形式知とし、学術的研究資源を集中する（シーズとシーズの交流） 4. 細分化し高度化するデータを、現場の感性や企業トップの判断に繋ぐ技術が必須である。欧米ではスペクトルから「多変量解析」で新現象の発見や活用役に役立てる活動が日常化している 5. 動的計測により、従来表現できなかったプロセスの機序が明確になり、新たなプロセス特許としての知的財産確保への道を開く施策が望まれる
マックスプランク研	X線検出器	人材育成、基礎研究、その他（公定万、標準化）	ボスドクの流動化 公定法などの高い目標設定
マドリッド・アウトノマ大学	広立体角スペクトロメーター	研究開発資金援助、基礎研究、異分野融合	真に革新的な技術は基礎研究なしには生まれにくい。プロジェクト研究への集中投資とともに、短期的な成果にはつながらない研究への幅広い研究費の配分も必要である。
Ion ToF社（ドイツ）	現在世界をリード	研究開発資金援助、人材育成、国際連携、基礎研究、異分野融合	
Uppsala University, ETH, Frankfurt Universityなど。	電子捕獲／移動解離、MALDIイオン化、オービトラップなど	研究開発資金援助、人材育成、基礎研究、異分野融合	質量分析関係では、近年多くの大型予算等が配分されているが、純粋な基礎研究や装置開発関係への配分より、応用研究への配分がかなりのウェイトを占めている。国内メーカーの力不足もあり、結果的に、海外のメーカーの装置を大量に導入することになり、ますます国内の基礎研究や装置開発能力は下降していつている。国内にも、阪大などで独創的な技術開発がなされているが、装置開発や基礎研究を行っている大学の研究室がこの10年ほどでどんどんなくなっており、人材不足は大きな問題になっている。
ブルカー、パナリティカル	2Dのワイヤー検出器 X線用CCD検出器 ピクセル検出器 1次元高速検出器（イクセレレーター）	人材育成、国際連携、基礎研究	X線の高効率、高分解能の2次元検出器の開発：市場は小さい。開発には人材の長時間投入が必要で、開発されたとしてもコスト高になり勝ちで、普及は容易に見込めない。大学、研究機関の基礎研究に期待したいが、研究成果は即出てこないのと、成果はインパクトが少ないので、研究者はこの基礎問題に興味を示さない。成果を即期待するような研究開発資金援助には頼れない所がある。考えられるのは国際連携の共同開発である。国際共同開発研究に資金援助が利用できれば+になる。
		シーズとニーズの交流	
Vrije University Brussel（ベルギー）	The Kinetic Plot Method	施策（税制、調達）、研究開発資金援助、人材育成、基礎研究	イノベーションファクター実現に向けた産官学による基礎研究の協同
		研究開発資金援助、基礎研究、異分野融合	基礎研究研究資金の投資と異分野融合を有機的に組織化による開発推進を積極的に推進する必要がある。化学、IT、ナノテック、バイオを融合した新研究領域の開発体制構築が必要。
マックスプランク研	シミュレーションに基づくμデバイス作製	研究開発資金援助、人材育成、基礎研究、異分野融合	基礎研究への資金援助／異分野の技術融合に対応できる人材の育成。
日本のPascal CoによるレーザーMBEを世界のトップとすると、オランダのTwente大の技術もかなり優れている。		研究開発資金援助、人材育成、基礎研究	機能酸化物薄膜における酸素欠損の定量化（しかも空間マッピングしながら）を可能にするには、全くの新しい技術が必要であり、基礎研究に人材および資金の投資をすることが一番効果的と考える。
インベリアルカレッジ	マイクロリアクターを使ったインテリジェントナノ粒子開発プロセス	研究開発資金援助、異分野融合	

Q6. 「科学シーズと産業ニーズをつなぐ先端計測」の課題設定について		その他自由コメント
賛同する	交流の場の設定、交流への資金援助、応用展開への資金援助、原子操作技術のナノ材料・ナノデバイス・分子組立応用への基礎研究	計測は、科学と技術の掛橋＝学問と現場の橋渡し役 純粋な各論と複雑な総論との翻訳科学である。いわば科学と人間の感性とのハーモニーを奏でる仕事である。
賛同する	ブロープ計測における再現性向上への努力	日本には、この対話が双方向でない、欧米に比べ産官学の協働体制の弱さの課題がある日本の財産は産業現場の持つナノ感覚であると確信している。科学万能の神話から多発する事故で人間が自信を失いつつある今、現場の感性豊かな人間にこの自信をつけさせるために科学を方向付けられないだろうか？
どちらとも いえない	産業界から見ると、先端計測そのものに特効薬的な戦略性があるので、基礎から応用という流れでよいかどうか疑問です。ニーズを持つ人々が、基礎研究成果を発表する場に容易に集まれるようなワークショップを企画することは良いかもしれませんが。	1. 基盤技術産業の強化・差別化をもたらす計測技術改革の課題プロセスをエネルギーロスの無いばらつきを究極に抑えるモノづくりへの寄与が必須。 塗布型有機半導体の実現には、ナノレベルの挙動をミリ秒以下の単位で把握しこれを制御する勘所をつかむ計測技術開発が必要
賛同する		2. 先端産業の強化・拡張の牽引力になる計測原理の実体化（プロトタイプ）未知のナノ現象を研究者の感性に直感的に繋ぐ動的挙動計測技術が必要であり、研究者の意図のままにエネルギーを投射でき、その応答をリアルタイムに把握する手応え感に繋がる動的計測技術と、短時間に膨大なデータが排出される中から意味のあるデータのみを抽出して把握するための、時間軸での微妙な変化を抽出する高速リアルタイム解析のための、アルゴリズムとシステム開発が必要。
賛同する	テラヘルズ波開発は医学、テロ対策、情報通信分野の応用につながっているので、Translation Researchが是非必要	3. 先駆性・国際戦略性の高い計測一全く新しい産業分野を生む可能性を有する領域への先行投資（萌芽的課題） ものづくりに資する分析機器は、素材産業は赤外・質量分析・NMRであり、加工産業は赤外、SEM、XPSを応用してきた歴史がある。今後は世界的に、ナノバイオ・医療中心にナノからマクロまでの一貫した挙動追跡のための計測機器の開発投資が進むと考えられる。
賛同する	個性豊かな名のレベルの材料挙動に任意の「外」を与えたときのマクロの立体組織化・機能化にどのように反映するか、時間軸解析（四次元解析）の流れに各種の計測機器を、時間軸空間軸に整合させて総合解析できる仕組みの創出が望まれる。このようにするとナノレベルの研究シーズとマクロ機能のニーズとが一望の下に把握できるようになる。医師が、顕微鏡で顔色を見て（光）、内部の機能変化を聴診器で聴き（音）、打診して見えない内部の状態を把握する（手応え感）などして、人間の感性を総合して知識や経験則と照合して判断、治療する人間本来の持つ仕組みを、計測技術に繋げて、人間の感性をより高感度に、広く、精度良く活き活きとしたものに発展させていくことができないだろうか。究極の目的は、非定常現象を多変量解析的な見方で時間軸上の変化として捉えるような解析手法でナノからの声を聴き、ものづくりの勘所を人間の感性に訴えて、予測し制御することである。	ここで、時間分解能を生体レベルの挙動追跡に留めず3桁進めてナノ秒レベルの計測技術を開発しこれを、塗布型有機ELや有機半導体、有機光学膜などの高機能の材料とプロセスを駆使した、真似の出来ないものづくりへの転用を先行して進めるべきだと考える。
どちらとも いえない		共通して必要なのは未知の世界の情報を人間が直感的に把握できるトランスレーションだと考える。光で見るのは外形、音を聴くのは内部を知りたいとき・・・ナノに於いてはナノ電顕で外形と内部骨格を見る。 ナノからマクロまでの状態変化をトータルに把握できる「ラマンは光の聴診器」である。
賛同する	テラヘルツ顕微分光法、 実用レベルの近接場分光装置、高分解能TEM-EELS	先行着手すべき課題は、分析機器環境を新しいナノ現象を起こし観察するミクロボ化して、ナノ現象を直感的に人の感性に繋ぐための計測・解析システムを創成し、その中で「見る」「知る」「操る」遊びを通して目ざとく宝物を発見する喜びを動機付け、次世代人材の眼・耳・感性を高めるような、機器開発の方向付けと意識的な次世代育成施策が重要と考える。
どちらとも いえない	質量分析では、普通に行われていることと思われる。	ここに、産官学の協働体制が集中すべきではないか。
どちらとも いえない (よく分からない)		以上
どちらとも いえない	液体加膜グラフィーのマイクロチップ化を課題として、半導体製造産業、カラム/分離場における物理化学的研究、分析機器の製品開発など複数分野の連携	
賛同する	ナノテクを産業化するための革新的試作・製造技術	
どちらとも いえない		
賛同する	“Translational Measurement Research” とするとやはり“基礎Measurement”のTranslation “というよりは” Translational “についての” Measurement “ととられる可能性があります。	
賛同する	ナノテクの産業化に備えたオンサイト・オンディマンドのナノ材料（粒子）合成システムの開発	

※Q7-Q10の結果は記載せず



Appendix 2: 事後アンケート

本ワークショップ開催終了後、参加者の意見の再整理を目的として、以下の内容のアンケートを行った。次項にアンケート結果を整理し、一覧表とした。

1. ご氏名：

2. 産業発展・国力強化のための計測・分析技術へのニーズ

産業分野と具体的なニーズ、可能性の例を1～3程度挙げ、できれば技術や社会的（規制）バリアについてコメントして下さい。また、産業界に所属されていない方も、アイデア／ご経験に基づいたコメントをお願いします。

（例） マイクロエレクトロニクス産業におけるナノスケール欠陥、プロセス解析

3. 計測・分析側から見た産業応用（イノベーション）

（例1） 収差補正原子分解能TEM技術（素材産業など）

（例2） THz技術の展開（安全管理、食品）

（例3） 量子コンピュータ関連技術と産業の組合せ

4. Serendipitousな計測、産業技術に関する自由な発想（思いつき）

5. その他、自由コメント（WSの感想、俯瞰軸の再設定、等）

以上ご協力ありがとうございました。

アンケート結果、とりまとめ概念図

事後アンケート結果を元に、産業ニーズと技術イノベーション課題を個々の計測原理セルに整理した。また、次ページに、アンケート結果を示す。



ワークショップ概要

セッション報告

Appendix

産業分野	課題	現状	技術的課題	技術的進展	技術的展望	技術的課題	技術的進展	技術的展望
製造業	関連タンパク質の構造解析 生体高分子(蛋白質)の反応ダイナミクス 医薬品の工程管理(結晶多形の判定) 薬効成分および不純物の多様な高速高分離選択性分析 光アミノ酸(アミノ酸)の生体利用(胃腸機能)の診断(胃腸がん等の早期発見、...) 医学応用(皮膚癌の診断、火傷の診断、その他の皮膚疾患の診断、癌などの治療)	X線結晶構造解析 溶液中高速・高分解能その場観察 THz技術の展開	溶液中高速AFM(製薬業界など) マイクロチップ液体クロマトグラフ(ライオン分野) TOF-SIMSの空間分解能・感度の向上(マクサウエル研究所、ハイオク、...)	わが国では、主に米国との共同で開発され、THz技術は急速に進歩しつつあり、当初、実用化までに5年から20年かかると思われていたが、5年以内という可能性もでてきた。	わが国では、主に米国との共同で開発され、THz技術は急速に進歩しつつあり、当初、実用化までに5年から20年かかると思われていたが、5年以内という可能性もでてきた。	わが国では、主に米国との共同で開発され、THz技術は急速に進歩しつつあり、当初、実用化までに5年から20年かかると思われていたが、5年以内という可能性もでてきた。	わが国では、主に米国との共同で開発され、THz技術は急速に進歩しつつあり、当初、実用化までに5年から20年かかると思われていたが、5年以内という可能性もでてきた。	わが国では、主に米国との共同で開発され、THz技術は急速に進歩しつつあり、当初、実用化までに5年から20年かかると思われていたが、5年以内という可能性もでてきた。
医療産業	生体可視化 各種-Omicsの高速・高精度・高感度の分析(プロテオミクス、メタボ*他) 食品中の有害成分分析 酵素基質、抗原抗体の分析、生体内タンパク質の分別検出、状態解析 食品の製造管理(異物混入など) 土壌中の有害成分分析 新しい環境監視技術(多様なガス検出)	THz技術の展開	THz技術の展開	THz技術の展開	THz技術の展開	THz技術の展開	THz技術の展開	THz技術の展開
食品・バイオテクノロジー産業	環境可視化 微量物質等の可視化 新しい環境監視技術(プラント診断、有価証券など)	THz技術の展開	THz技術の展開	THz技術の展開	THz技術の展開	THz技術の展開	THz技術の展開	THz技術の展開
環境産業	環境可視化 微量物質等の可視化 新しい環境監視技術(プラント診断、有価証券など)	THz技術の展開	THz技術の展開	THz技術の展開	THz技術の展開	THz技術の展開	THz技術の展開	THz技術の展開
セレクトロニクス産業	環境可視化 微量物質等の可視化 新しい環境監視技術(プラント診断、有価証券など)	THz技術の展開	THz技術の展開	THz技術の展開	THz技術の展開	THz技術の展開	THz技術の展開	THz技術の展開
製造(ものづくり)産業(分断制御・ロボティクス管理)	環境可視化 微量物質等の可視化 新しい環境監視技術(プラント診断、有価証券など)	THz技術の展開	THz技術の展開	THz技術の展開	THz技術の展開	THz技術の展開	THz技術の展開	THz技術の展開

Appendix3: 講演資料

趣旨説明 (鯉沼秀臣)

基調講演 (二瓶好正)

S1-1. 電子顕微鏡 (杉山昌章)

S1-2. 高速液体クロマトグラフィー (伊藤正人)

S1-3. XRD (原田仁平)

S1-4. 核磁気共鳴 (本河光博)

S1-5. SPM (森田清三)

S1-6. 質量分析装置 (豊田岐聡)

S2-1. 新しい原理によるTHzテクノロジー (安岡義純)

S2-2. 表面プラズモン利用分光 (河田聡)

S2-3. イオンビーム計測 (木村健二)

S2-4. 3次元アトムプローブ (宝野和博)

S2-5. 光熱分光 (澤田嗣郎)

S2-6. X線分光 (河合潤)

S3-1. ジョセフソン効果によるTHz波発振の理論と実験 (立木昌)

S3-2. 超伝導人工原子・マイクロ波単-光子系の量子もつれ計測 (仙場浩一)

S3-3. ホトニッククリスタル (PC)の応用利用 (馬場俊彦)

S4-1. μ ケミストリーと一分子計測 (北森武彦)

S4-2. ものづくりとリンクした複合計測 (竹内一郎)

S4-3. アメリカの計測情報技術の最前線 (竹内一郎)

S4-4. 話題提供 (斉木敏治, 石井哲也)

総合ディスカッション (石田 英之)

「科学技術シーズを産業につなぐための先端計測」
 ー日本の産業力強化に資する先端計測技術の課題ー

俯瞰ワークショップ

2008年1月12日(土)
 コーディネーター: 石田英之(東レリサーチセンター)
 JST研究開発戦略センター

計測技術と産業分野: 俯瞰へのアプローチ
 080112 HK

1 実・時空間の視点による俯瞰
 ーものづくりの流れー
科学技術シーズ、ニーズ、コンセプト→設計・開発→製造→製品・検査
 ー[計測・分析]ー: 測定原理 vs. 測定対象→ **基本俯瞰図**
 ・2006年12月WS: 「ものづくりにおけるハイスループット先端計測」
 ー[産業]ー
 ・NISTによる11分類(2007年2月): 計測はイノベーションの鍵、障壁を低減
 ・産業連関表をベースとする18分類(井上G)

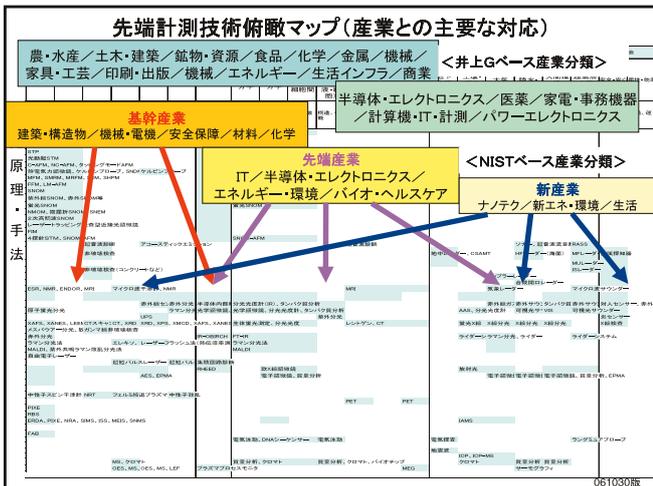
2 進化(イノベーション)・時空間の視点による俯瞰

<計測技術/産業分野> → <研究開発> → <新技術/新産業>
 (現状) 科学シーズ、環境変化 突然変異、改良・改善、(淘汰)

科学シーズと産業ニーズをつなぐNonlinear, Disruptiveな大きな流れを俯瞰し、スムーズな連結の道を探る

- ・変化の動機、スピードを支配する“温度因子”を考慮した俯瞰: 3x3の実部
- ・“位相(Imaginary)因子”の考察(虚(サイバー)部): インфомァティクス

データベース、データマイニング、ネットワーク、規制、規格、標準



ワークショップにおける産業・計測分野分類について

【**新産業**】 ナノテク/新エネルギー・環境/新ライフスタイル産業などに代表される、今後新しい社会ニーズや科学シーズから生まれる萌芽的産業

【**先端産業**】 IT/エレクトロニクス(半導体)/エネルギー・環境/バイオ・ヘルスケアなどに代表される、製品の改善/開発速度が速い比較的新しい産業で、製造プロセスの改善余地が大いにあるとともに、新技術が次々と導入され、変化が速い産業。

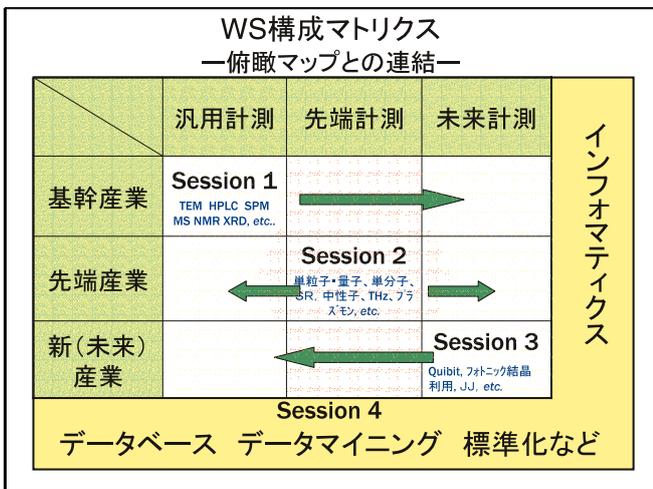
【**基幹産業**】 建築・構造物/機械(・電機)/国家・安全保障/食料/化学などに代表される、変化が比較的リニアで、既に大きな産業

※NISTの産業11分類(農業、商業、食品、生活産業の分類なし)との対応を考慮

【**汎用計測技術**】 産業製品として商品化され、一般に変化はリニアであるが、ブレイクスルーへの日常的ウォッチを必要とする技術

【**先進計測技術**】 開発~展示・プロトタイプレベルで、ユーザーとの連携、開発における分野融合が重要な技術

【**未来科学技術**】 科学シーズ(発明、発見、可能性予言)をベース西、計測の革新、新産業創製を期待できる技術



日本の産業力強化に資する計測・分析技術の課題
 イノベーション因子の探索

H20以降の先端計測事業インプットにむけた検討課題

セッション1. 基幹産業のニーズに寄与する汎用計測改革技術
 ー既存産業の強化・差別化をもたらす計測技術の課題とは

セッション2. 先端産業のニーズに寄与する革新的計測・分析技術
 ー競争の激しい先端産業の強化・拡張の牽引力となる計測原理の実体化(プロトタイプ)に関する課題とは

セッション3. 新産業の創出に寄与する未来計測・分析技術
 ー先駆性・国際戦略性の高い計測ー全く新しい産業分野を生む可能性を有する領域への先行投資/萌芽的課題とは

セッション4. 計測基盤技術の開発(データ処理・解析・認識までを含む)
 ー計測知識の構造化・価値化を促進するための課題とは

目的

1. 科学技術と産業をリンクする新たな計測・分析の構築に資する俯瞰マップをつくる。このため、以下の3分野と3者に共通する基盤技術(情報、国際戦略)をベースに課題をスクリーニングし、今後の計測・分析の研究開発像を探る。

- (1) 基盤産業の強化・差別化をもたらす計測技術改革の課題、
- (2) 競争の激しい先端産業の強化・拡張の牽引力となる計測原理の実体化(プロトタイプ)に関する課題
- (3) 先駆性・国際戦略性の高い計測—全く新しい産業分野を生む可能性を有する領域への先行投資(萌芽的課題)
- (4) 上記課題の実体化の背景にあり、研究開発の実現をスムーズに進行させるための、情報、社会技術の課題

2. 上記の検討課題を俯瞰マトリクスに反映し、JST/CRDSで検討中の産業技術イノベーションに資する計測分析俯瞰マップを拡充する。

マトリクスシート記入による俯瞰図補完資料作成の協力お願い

配布した[3x3+1]マトリクスシートの欄に、ご自身および周辺における今後の重点研究テーマとその戦略(科学シーズ、環境因子)、効果(技術革新、産業創出)の可能性等について、自由にご記入下さい。

- (例1) TEM/素材産業→収差補正小型高分解能化→ナノ構造材料・デバイス産業
- (例2) iPS細胞計測/新産業・分野→小型高速多元計測化→優先権確保による新産業
- (例3) 材料データのハイスループット計測/虚部→国際ネットワーク→データ活用産業
- (例4) マイクロチップ計測/先端産業→規格化→新産業

イノベーション創出のための 先端分析機器開発

東京理科大学 二瓶好正

- 1) はじめに
- 2) 米國における計測分析システム開発の動向
- 3) 先端計測分析技術・機器開発の現状
- 4) おわりに-将来の方向

1)はじめに

我が國におけるものづくり文化
—技術の伝承と人材育成—

1)はじめに

(1)人づくりはものづくりから

伊勢神宮の式年遷宮は何故必か？

- * 伊勢神宮の式年遷宮
奈良時代から20年に一度神殿を新しく造営し遷宮
→ 神殿造営技術の継承(人づくり)が目的
- * 遷宮の際、工芸品も多く奉納される
→ 新しい工芸技術の創成の機会

ものづくり技術の伝承

- * 実際にもものを作る行為が不可欠
名人のマニュアルも、実際の経験に及ばない。
- * **ものづくりによる人づくり**
若者へのモチベーション
- * **「ものづくりは人づくりから」**
20年ごとにゼロからつくり上げる
人から人への伝達

(2) 科学技術と計測分析機器

**基礎科学の牽引車、
産業技術のキーテクノロジー**

(2)科学技術と計測分析機器

① 道具が世界を変える(量子的飛躍) —道具から見た科学技術史—

- History 歴史(トインビー等による)
- Herstory 母史(女性の目での歴史)
- Instru-story 器史(道具・装置の目での歴史)

科学技術における発見、発明の歴史を、装置開発の目から見た科学技術史

- * マザーツール(工作機械)
- * マザーインストルメント(計測分析機器)
世界一の道具を創れる國が**世界をリード**する

計測分析機器の産業への貢献 (非線形な波及効果)

製造業において、研究・開発、製造・管理・歩留まり向上技術、安全・管理技術、品質管理・クレーム処理、環境管理等へ貢献。

生産性の向上のための技術貢献が重要。故障解析、設計監査、生産技術改善・向上、生産装置改善・向上、原材料監視、製品評価等。

2) 米国における計測分析システム開発の動向

2) 米国における計測分析システム開発の動向

①背景(その1)

- 2005年ブッシュ大統領「米露競争力イニシアティブ」American Competitive Initiative(ACI)を発動
エネルギー省(DOE)、国際科学財団(NSF)と国立標準技術研究所(NIST)を指名。

理由: 科学と産業を結ぶ計量技術はイノベーションの要。NISTは科学的発見から技術開発、商用化までを支える。イノベーションのライフサイクルを支えるテクノロジーインフラを提供している。
「イノベーションエージェンシー」だと認知した。

2) 米国における計測分析システム開発の動向

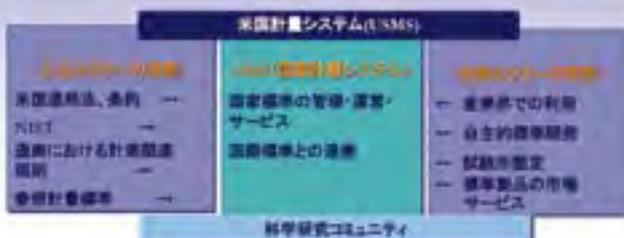
①背景(その2)

- NISTは「計量」と「標準」を担当する国立研究所である。今後米国のACI戦略の一環として米国計量システム(United State Measurement System:USMS)のネットワークの中核としての役割を果たす。
- 米国のイノベーション戦略は計測分析技術・機器開発を主軸として今後強力に展開されることになろう。

2) 米国における計測分析システム開発の動向

②米国計量システム(USMS)とは?

- 国家計量システム(NMS)を中核とし、計量の開発、供給、利用、認証に係るすべての関係者(公共セクターと民間セクターを含む)ネットワーク



2) 米国における計測分析システム開発の動向

③NISTによるUSMS5アセスメント調査(2001)

- 目的: 新しい産業及び成熟した産業共に、近年の技術の高度化・複雑化に伴って、より高度な計量技術が求められている。イノベーションに必要な計量技術と現在の技術とのギャップ(ニーズ)を評価する。
- 対象: 11産業および技術分野
- 方法: **ロードマップ分析**
~2006年までに提出された164の報告の分析
ケーススタディー
ワークショップ(15)、関連機関(120~)、1000人の産官学の関係者とのインタビュー

2) 米国における計測分析システム開発の動向

③ NISTによるUSMS5アセスメント調査(その2)

11の産業及び技術分野

- 建築・構造物
- 化学
- 国防・国土安全保障
- 部品製造(含自動車)
- エレクトロニクス・ITハードウェア
- エネルギー・電力・環境
- ヘルスケア(含バイオイメージング)
- ITソフトウェア
- 材料
- ナノテク
- 半導体エレクトロニクス

2) 米国における計測分析システム開発の動向

④ 調査結果(その1)

分野別計測障壁突破のための計測ニーズ

建築・構造物 (23件)
環境の安全とコスト削減の両立が必要、多次元リアルタイム計測が必要、標準試験法と信頼できる公正なデータが必要。

化学 (22件)
製造プロセスインベーションのために、過酷な条件下でのインライン/リアルタイム計測を可能にするセンサー技術が必要。
ナノテクインベーションの計測課題解決のため、感度の高いナノスケール計測技術が必要。

国防・国土安全保障 (35件)
現場条件下での正確で標準化された計測手法が必要、この分野の新しい技術を実現するために、さらに高度な計測技術が必要。

部品製造(自動車を含む) (62件)
多くの技術・分野を横断する製品の三次元形状の高精度計測技術が必要。

2) 米国における計測分析システム開発の動向

④ 調査結果(その2)

分野別計測障壁突破のための計測ニーズ

エレクトロニクス・ITハードウェア (32件)
システムレベルで企業間の計測標準が生じている。データ駆動デバイスでは、ナノスケール分解能の形状計測、顕微鏡・光学的計測が必要。

エネルギー・電力・環境 (27件)
代替燃料や代替電力源のための新技術に必要と成る、規制と基準作りのための計測技術が必要。

ヘルスケア(バイオイメージングを含む) (77件)
この分野の技術革新を進めるには、政府による計測技術と標準の開発能力が必要。
また、化学、物理、材料、IT等の専門領域と生物医学の専門領域を共に継続した学際的な研究によるアプローチが必要。

ITソフトウェア (33件)
この分野でのインベーションを助けている計測課題解決のためには、ソフトウェアとシステム性能の計測が必要。

2) 米国における計測分析システム開発の動向

④ 調査結果(その3)

分野別計測障壁突破のための計測ニーズ

材料 (40件)
複雑な物質系の構造・性質を正確に分析する計測標準・技術が必要。
製造と市場化の段階で予測される、新しい材料の性能と信頼性を適切に評価するためには計測インベーションが必要。

ナノテク (16件)
ナノスケールで物質の物理的、化学的、生物的特性を正確に、高分解能で分析する最先端計測分析手法が必要。
ナノ材料・デバイスの特性を高次元に渡る能力を持つ計測分析法の欠如は、ナノテクインベーションの大きな障害である。

半導体エレクトロニクス (32件)
物理計測の精度が標準の懸念は、シミュレーション技術により解決可能であり、システムレベルでの計測が必要。
この分野の技術インベーションの計測課題の解決のためには、新しいプロトタイプ計測標準の開発も必要。

2) 米国における計測分析システム開発の動向

⑤ USMSの課題

① 計測標準化の重要性を認識する文化の醸成が、標準化の推進に不可欠である。

- 精度と信頼度は各分野・領域に共通の計測標準である。
- 精度を向上する技術開発が滞っている。
- 急激な技術の進歩や社会の実化に巧むて、根本的に新しい計測技術が要求されている。
- 医療、半導体などの電子技術、情報技術、通信、ナノテク、材料分野で深刻。

② ナノスケール分解能の三次元計測、標準化の標準化が求められる。

- リアルタイムで製品にデータを与えない方法が必要である。
- 過酷な環境下(高温、高圧、腐食性雰囲気)でも動作する高度な感知技術が必要である。
- 化学、エネルギーと電力、基礎材料、自動車、金属加工などの分野で深刻。

③ 幅広い技術的ニーズをカバーして計測標準を確立、標準、検証、普及を促進する必要がある。

ソフトとハードの性能と相互運用性に関して、標準化と性能基準が技術の進歩に遅れている。(国防と国土安全保障、医療等、情報システムに依存する部分が多い分野)

- 経済やインフラに不可欠であるシステム性能を確実に予測するニーズが高まっている。
- 製造業において新しいシステム技術が利用できていない。
- (建築、医療、国防、国土安全保障、ITなどのサービス分野でのシステム性能計測技術の欠如)

2) 米国における計測分析システム開発の動向

⑤ 今後の目指すべき方向(その1)

イノベーションを加速するための戦略

イノベーション加速のための7つの提言

- (1) 計測ニーズの社会的認知度の向上
- (2) 計測課題を解決する能力を有するグループ・研究者の連携
- (3) 計測技術のブレークスルーを促進する新しい協創
- (4) 計測ニーズの優先順位の決定
- (5) 産業界の具体的計測課題の解決を支援
- (6) 産学共通の計測ニーズを分析し、相乗効果を活用
- (7) 計測技術の商業化促進

23年度における計測分析システム開発の方向

⑤ 今後の目指すべき方向(その2)

計測インフラの構築
成長中で急速に実用化し、技術的に高度な産業からの計測ニーズを満たすために、USMSにより計測インフラを構築する必要がある。

産学官の協力
USMSをさらに改善できるかは、米国と世界の様々な組織協力が必要である。公共セクターと民間セクターとの協力により、技術イノベーションを阻害している計測障害を解決できる。

国際協調
国際的な計測システムと歩調を合わせながら、計測ベースの標準化でリーダーシップを取ることでグローバル市場へのアクセスと効率的取引を可能にする。

まとめ

- 米国は**計測分析技術**を国際競争力強化の**国家戦略の中核**に据えた。
- 計測分析技術は**イノベーション**実現のための**キーテクノロジー**。
- 大規模な調査により、計測分析技術の強化戦略を具体化しつつある。
- USMS強化のため、**NISTの予算**を10年間に**2倍**とする計画を決めた。

3) 先端計測分析技術・機器開発事業の現状

先端計測分析技術・機器開発事業の概要

平成20年度予算科 5,500億円
科学技術振興機構の経営 成遂すべき事業と意思

世界最先端の研究者のニーズに応えられる **最先端計測分析技術**の計測分析機器開発
および **最先端計測分析技術**に貢献する計測分析機器開発を推進

- 基礎技術の創出から実用化(製品化)まで一貫して開発を支援
- 自由な発想に基づく提案を広く募る提案公募型の推進
- 研究開発現場・応用(ものづくり)現場におけるイノベーションを推進

第1段階(基礎技術の創出) | 第2段階(プロトタイプ開発) | 第3段階(実用化開発)

全く新しい発想に基づく新原理の探索を通じた新たな計測分析手法の基礎技術の創出 | **提案公募型** | 実業技術開発プロトタイプ開発 | **産学官連携**

現在:金の切れ目が縁の切れ目 研究開発されたものが死蔵されている

他分野の事業を他の創意的研究で出た芽を先端計測に繋げることが重要
先端計測で育った若木を生長させる
プロトタイプを活用し世界トップの研究成果を生み出す
製造された装置を産業利用し、世界に普及させる

まとめ

- 先端計測分析技術・機器開発事業の**効果的**、かつ**急速な発展**を期すべきこと。
- プロトタイプをさらに**進化**させるプログラムを幅広く活用すべきこと。
- 当面戦略調達**の**メカニズム**の整備が必要。
- その後、**市販装置**として**市場メカニズム**によりさらに**進化**させる。

4) おわりに — 将来の方向 —

(1) 世界の中の日本

- 日本の経済的な地位は年々低下している
例) 2050年世界のGDP%はコンマ以下?
- ものづくりにおいてイノベーション創出が必須
(**連続的波及効果の重視**)
例) 先端技術分野、知的創造基盤分野

問題点

- 知的創造基盤分野(大学)への支援不足
- ユーザー研究者(大学)の認識不足
外国製計測分析装置・技術への**ただ乗り意識**等
- 企業における**開発余力の低下**
大規模な研究投資と政策的支援が必要

(2) イノベーション推進の要

- イノベーション推進のためには、基礎科学、応用科学、産業技術等における**計測障害**を突破することが重要
- 計測障害の突破には先端計測分析技術分野に研究資源と人材をさらに投入し、**中・長期戦略**を立案することが必要
- 先端計測分析技術分野における**人材育成の強化**が必要

(3) 人材育成戦略(その1)

- 社会的理解の醸成
 - * 小・中学校での**ものづくり教育**の充実
 - * 高校・大学での**実験・実習教育**の充実
 - * 科学・技術博物館などの充実
- 研究者の養成
 - * 基礎研究から装置化研究まで**シームレスな研究費助成**(科研費、さきがけ・CREST, 先端計測など)
(科研費レベルの支援策が不十分)
(**旧試験研究の復活**等)

(3) 人材育成戦略(その2)

- 大学におけるものづくり力の強化
 - * **試作・工作室の整備**
 - * 中小企業との連携
 - * ものづくり技術指導者の配置
- ものづくり文化の顕彰
 - * **社会的顕彰**
 - * **学会での顕彰**
 - * **国家的顕彰**

(4) 開発と利用の架け橋

- 開発と製品化の間に「**壁**」がある
 - * 多くの試作品がお蔵入りとなる
 - * 開発者と利用者の**共同作業**が不可欠
 - * 「**死の谷**」を乗り越えるための資金不足
- 国費による装置開発研究の成果を最大限活用する政策が必要
 - * 開発研究者と利用研究者の連携による**機器開発**
 - * **プロトタイプ試作品の共同利用**が必要
(**プロトタイプ実証・実用化プログラム**)
 - * 各分野研究者による**共用**を通じ**完成度を高める**

(5)まとめ(その1)

- 「ものづくり」は「ひとづくり」から
(地味な分野に光を当てる政策)
- 「道具」が世界を変える
(道具の偉大な波及効果)
- イノベーションには「計測障害の突破」が必要
そのための「先端計測分析技術」強化
(先端計測分析技術の発見的性格、革命的性格)

(5)まとめ(その2)

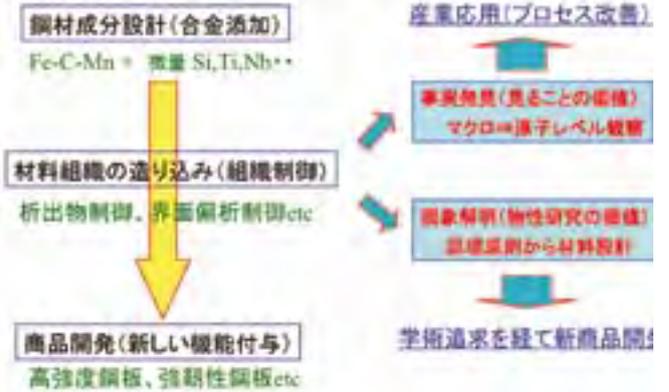
- 「創ってノーベル賞、使って世界一」
(基礎研究と産業技術の連続性・強相関性)
- 「死の谷」を越えよう
(ベンチャー企業の利点の利用、国家予算の効率化)
- 先端計測分析機器開発に**重点投資**を！
(予算の投入、さらには人材投入、公共の戦略調達)

科学技術シーズを産業につなぐための先端計測

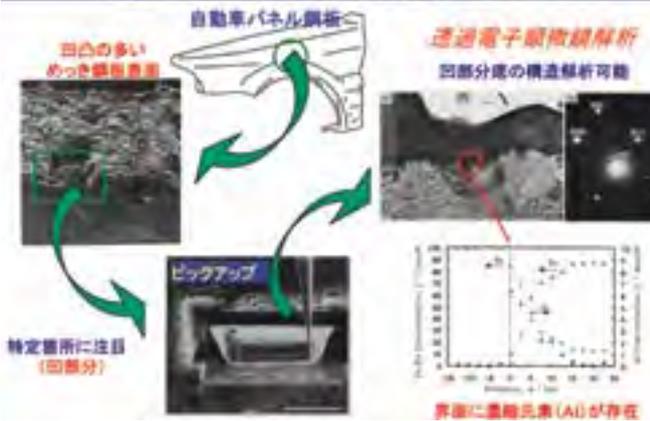
基幹産業&汎用技術
「電子顕微鏡」

新日本製鐵株式会社
先端技術研究所
杉山 昌章

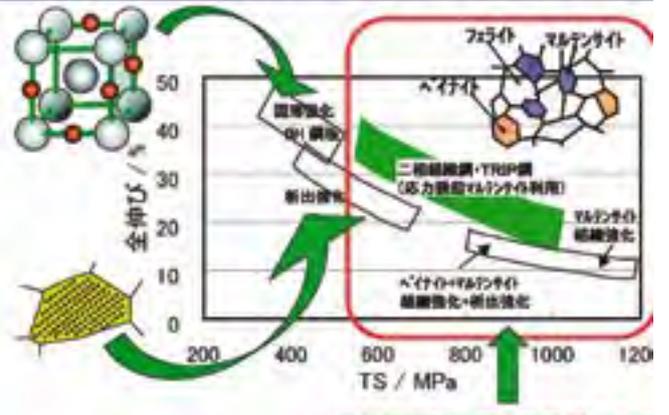
電子顕微鏡の鉄鋼業における価値



易成形性のパネル用薄鋼板 2/2



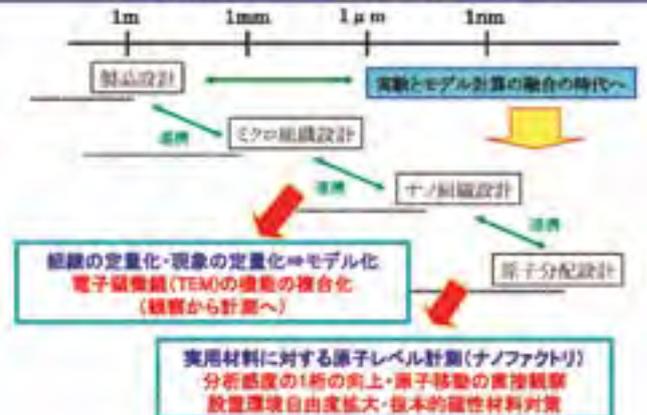
各種部品の高強度化と微細組織制御



複合組織の中でのナノレベル組織定量化



階層の異なる研究領域の融合



まとめ

- ◆社会基盤素材としての鉄、アルミ、・・・金属
 - ☆構造材料に対する原子レベルのアプローチが拡大しつつある。(未来型構造材料)
 - ⇒電子顕微鏡+α技術の必要性
- ◆製造技術に反映できる定量計測技術の導入
 - ☆薄膜効果を除いた動的計測技術の開発
 - ⇒原子レベル(ナノファクトリ)では可能

基幹産業のグローバル化⇒技術情報の共有化と真の競争
産業界における先端計測⇒直接的競争力に発展

俯瞰ワークショップ
「科学技術シーズを産業につなぐための先端計画」
(1) 基幹産業のニーズに答える汎用計測の革新的技術

高速液体クロマトグラフィー (HPLC)

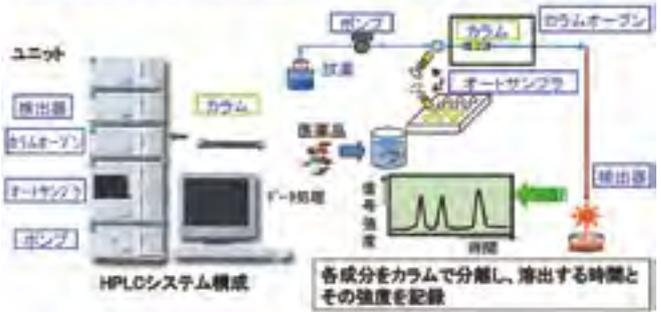
2008年1月12日(土)
於 JST・社会技術研究開発センター一会議室

株式会社日立ハイテクノロジーズ
伊藤 正人
©Hitachi High-Technologies Corporation

液体クロマトグラフィ概要

クロマトグラフィ=Chrom(色)+Graphos(記録法)

液体中の混合成分をカラムを用いて分離し定量する分析技術



HPLC(High Performance Liquid Chromatography)の歴史

年	できごと
1953	ロシアの植物学者Tsvetが吸着クロマトグラフィにより頁の色を分離した。
1958	Smith, Moore, Spackmanが系統的にアミノ酸を分析できる自動装置(イオン交換クロマトグラフィ)を開発した。代表的な分析時間は数十分間。
1959	日立社(旧)が汎用液体クロマトグラフィ(ディスクリート方式)を開発した。
1962	日立社(旧)がリアルタイム分析計(高速のフロー方式)を開発した。
1966-1970	この期間、LCが飛躍的に進歩した。カラム内部の固定相、高圧系、各種検出器の開発、UV検出、分析手法などが研究開発された。
1971	Kirklandが高度多孔性充填剤と化学結合固定相を開発し、現在のHPLC(高速液体クロマトグラフィ)が完成した。代表的な分析時間は数十分間。
1972	比較的狭いボラースポイマー日立ゲルの開発し、微細多孔性材料HPLCの特許に入った。
1979-1989	この期間、マイコン制御、グラビメント測定法、液体排液法、各種検出器、IC、データ処理装置によるシステムの全自動コントロール化などが研究開発された。
1990-2000	この期間は、HPLC、VLDI-MS、電子記録などの情報対応システムが開発された。また、各種LCMSが急激に普及した。
2004	数十種類の分析項目を数十分間で測定できる。

©Hitachi High-Technologies Corporation

HPLC2007 (17 - 21 June)におけるセッション

- Hyphenated Techniques
- Omics
- Fundamentals
- Sample Preparation
- Chiral Analysis
- Microfluidics
- Miscellaneous Application
- Micro-organisms
- Pharmaceutical and Biomedical Analysis
- High Pressure / High Temperature LC
- Metabolomics
- Monolithic Stationary Phases
- Capillary Electrophoresis
- Stationary Phases
- Biomarkers
- Pharma-SFC
- Comprehensive and multidimensional Techniques
- Pharma-Method Development
- Chemometrics

©Hitachi High-Technologies Corporation

HPLC2007 (17 - 21 June)におけるセッション

- Hyphenated Techniques
- Omics
- Fundamentals
- Sample Preparation
- Chiral Analysis
- Microfluidics
- Miscellaneous Application
- Micro-organisms
- Pharmaceutical and Biomedical Analysis
- High Pressure / High Temperature LC
- Metabolomics
- Monolithic Stationary Phases
- Capillary Electrophoresis
- Stationary Phases
- Biomarkers
- Pharma-SFC
- Comprehensive and multidimensional Techniques
- Pharma-Method Development
- Chemometrics

高速・高分離化に関連

©Hitachi High-Technologies Corporation

HPLCに関する最近の主な研究開発テーマ

高速化・高分離化

- High Pressure / High temperature LC
- モノスカラム(シリカ、ポリマー)
- マイクロチップ
- CEC (Capillary Electrochromatography)
- SDC (Shear-Driven Chromatography) など

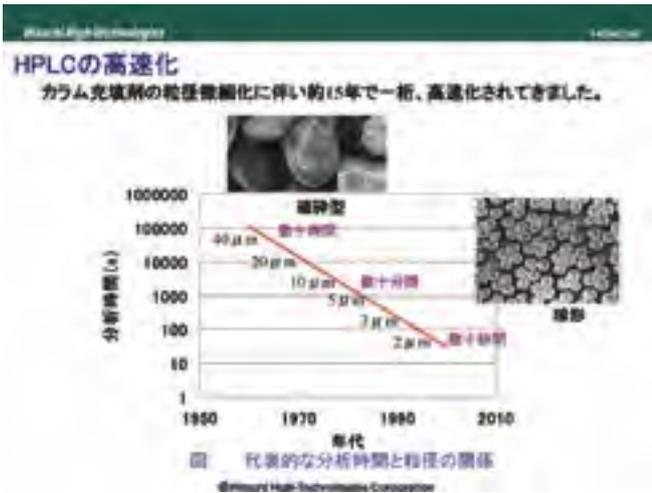
特異性・選択性の研究

- 逆相クロマトグラフィーの分離機構解析
- 光学異性体の分離
- ミセル動電クロマトグラフィー
- 多次元液体クロマトグラフィー
- アフィニティクロマトグラフィー
- Zwitterionic HILIC (Hydrophilic Interaction LC)
- 温度応答性クロマトグラフィー

高感度化(検出限界)

- ナノフロータイプ LC/MS など

©Hitachi High-Technologies Corporation

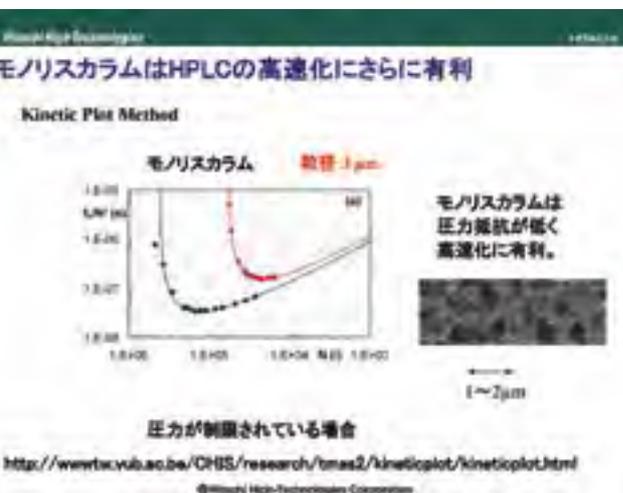
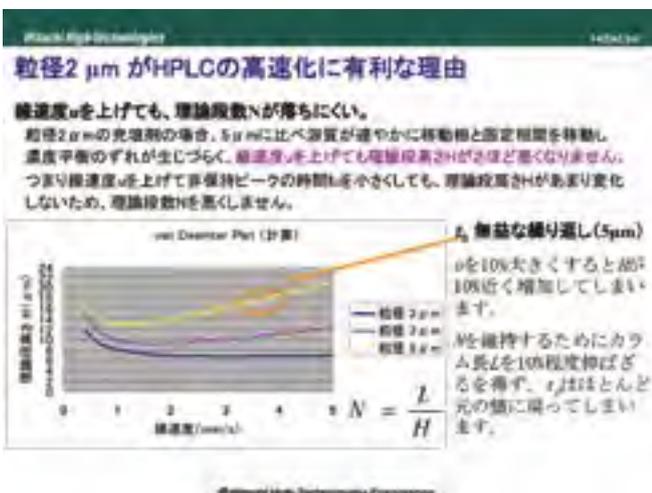
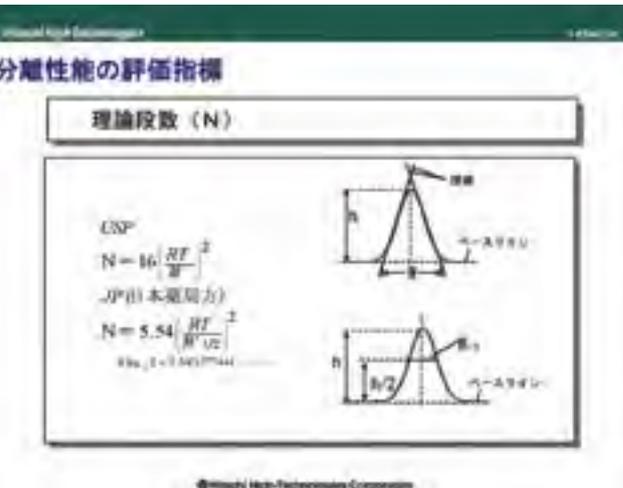
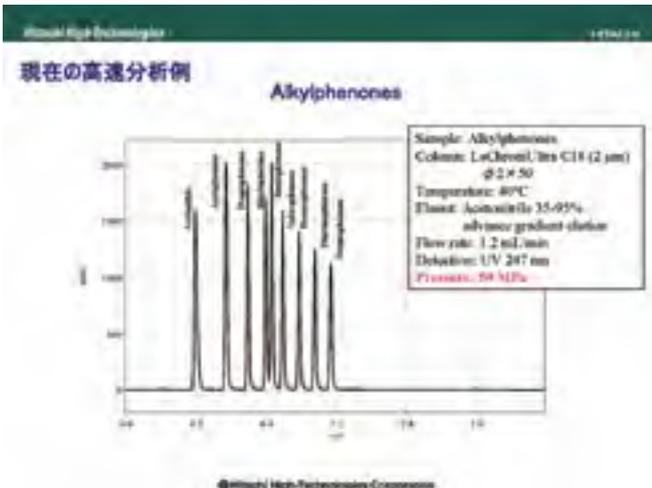


商用HPLCの高速化概観

LCの技術動向	HPLC		超高速LC	
	1980	1990	2000	2010年
1. 静電スクリーン付 (分析時間)	10	1	1	0.1
2. 静電スクリーン付 (20%の増分)	10	1	1	0.1
3. 静電スクリーン付 (20%の増分)	10	1	1	0.1
4. 分析圧力 (MPa)	10	10	50~100	1,500~1000
5. 分析温度 (°C)	40	40	40~90	80~90

高速・高分離化手段は
LCの技術動向は分析圧力・分析温度? 革新的手法に移行?

本質的なトレンド
高速化のためのマイクロ化



Mitsubishi High Technologies

マイクロチップによるマイクロ化は確実な技術動向



Anal.Chem. 2003, 86A

©Mitsubishi High Technologies Corporation

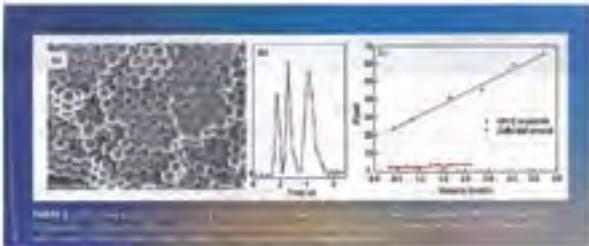
Mitsubishi High Technologies



Anal.Chem. 2007, 800

©Mitsubishi High Technologies Corporation

Mitsubishi High Technologies



Anal.Chem. 2007, 807

©Mitsubishi High Technologies Corporation

Mitsubishi High Technologies

CEC (Capillary Electrochromatography)
圧力駆動から電気的駆動へ

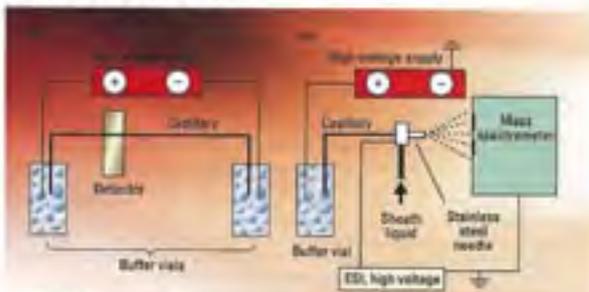


FIGURE 2. Schematic for CEC instrumentation (a) with UV detection and (b) coupled to an electrospray ionization mass spectrometer.

Anal.Chem. 2002, 203A

©Mitsubishi High Technologies Corporation

Mitsubishi High Technologies

SDC (Shear-Driven Chromatography)
せん断力駆動



Anal.Chem. 2004, 430A

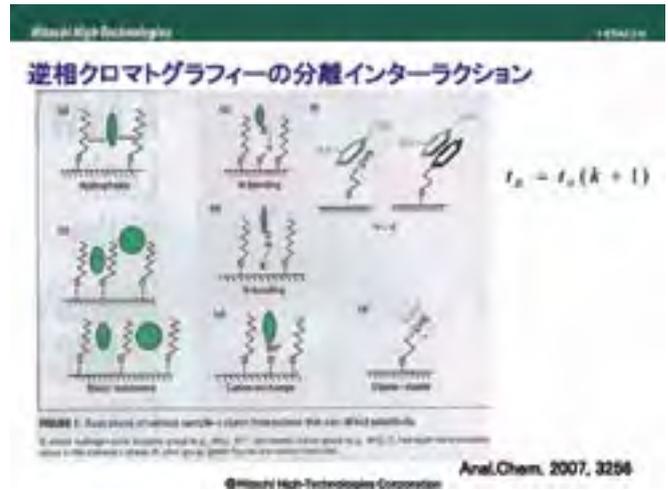
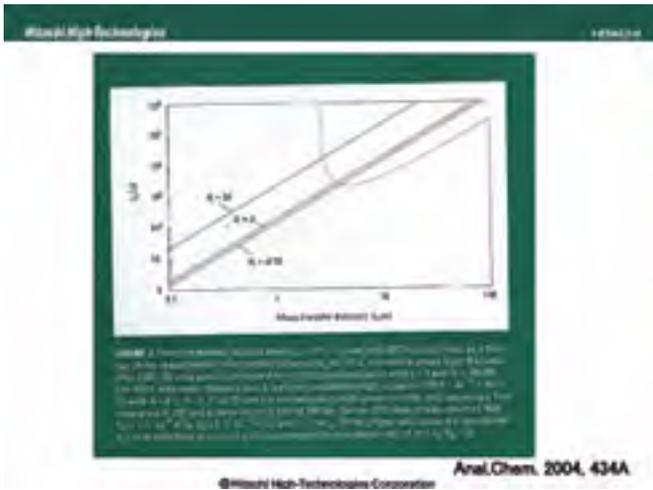
©Mitsubishi High Technologies Corporation

Mitsubishi High Technologies



Anal.Chem. 2004, 432A

©Mitsubishi High Technologies Corporation



まとめ

HPLCの高速・高分離化は
 圧力駆動から電気的駆動へ移行することが考えられます。
 せん断力駆動の可能性もあります。

マイクロチップ化は確実な技術動向と思われま

X線回折法 (XRD)

JST前編ワークショップ (080112)

原田 仁平

株式会社 リガク 特別顧問
(名古屋大学名誉教授)

JPhitasee-1-

米国標準局 (NIST) のレポート

「計測技術の革新なくして産業イノベーションは生まれ得ない」

JST CRDS 井上グループ

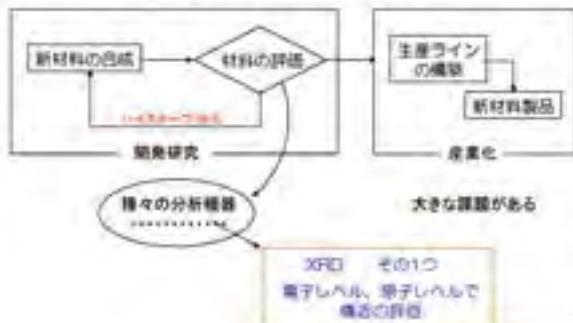
現状を打破し、日本の産業力を強化し、イノベーションを誘発するには、
重要な計測課題の高速化、高効率化の達成、つまり計測技術の
『ハイスループット化』
が必要不可欠であることを訴えた

同書である
加えて継続性を考えると
グローバル化した環境下での教育の重要性も訴えたい

JPhitasee-2-

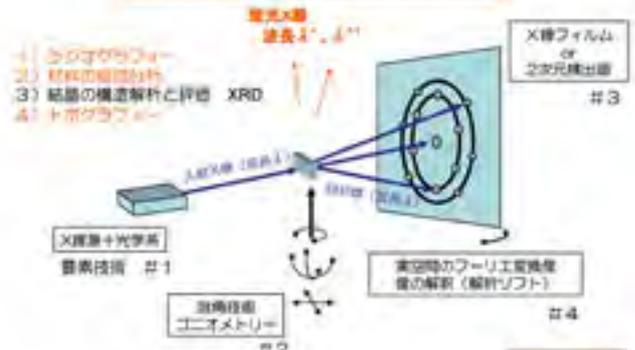
もの作りの基本

機能性新材料の開発
金属、磁性材料、誘電材料 惹りであった



JPhitasee-3-

物質にX線を照射すると



JPhitasee-4-

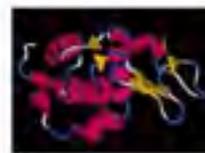
最近のX線回折装置 R-axis IV (リガク)



Rigaku

低分子単結晶～生体高分子 (タンパク質) X線により3次元立体構造の解析

ヒトゲノム解析からプロテオーム (タンパク質の全体像)
解析へ生命を変える全ての代謝反応の分子レベルでの解明
へ新薬開発を強力に支援



ポストゲノム、蛋白5000, 3000 をオーバーカムできた

Rigaku

XRD関連で3つの課題

① 既存産業の強化・差別化をもたらす計測技術の課題

X線源・光学系 測角機構 検出器 システム化ソフト 解析ソフトの最新技術開発

② 先進・拡張の牽引力となる計測原理の実用化に関する課題

新しい原理に基づく2D検出器
次期光源はFEL、干渉性の高いポラトリーX線源

③ 先駆性・国際競争性の可能性が高い計測

全く新しい産業分野を生きよむような領域への先行投資、

過去にはX線の2D検出器として
イメージングプレート（IP）がそつであった様に
高分解能でその情報量が可能な2D検出器
これはXRDのみでなくラジオグラフィの分野にも幅広く利用される技術

JPRNews-7

(株)リガクの経緯

回転対称型 X線源
真空真空シールド
富士フィルムのイメージングプレート
多層膜光学素子
海外企業との共同開発

JSTプロジェクトによるVSGC（2D検出器の開発）失敗

1Dアレイ高速検出器（D-Tek Ultra）
2Dピクセル型検出器（PILATUS100K）

大学、研究機関による種別開発に期待
→ 最初に共同開発論文になるデータが出れば終了
↓
 その製品化にはどのくらい高い
標準的な結果では不十分
（安定性のテスト）
↓
 研究者はこの種の基礎研究に時間をかけない
研究成果は即時でできないから
↓
 グローバル化した調査
国際的連携の共同開発に進み込む

表1
日本のグローバル化の課題：国際共同種別研究：資金援助？ JPRNews-8



検出器 高速1次元X線検出器 DTeX Ultra

当社は従来比100倍の高速測定ができる、高計数率・高エネルギー・低ノイズの新型高速1次元X線検出器です。

高いエネルギー分解能で低バックグラウンドデータ測定を実現しました。高速測定、その検定や検定試料・微小検体の測定に威力を発揮します。

製品の特長・仕様

- ・**高速測定** 従来比100倍（当社標準型検出器との比較）の高速測定を実現しました。
- ・**高エネルギー分解能** 高速1次元X線検出器としては最高水準の高いエネルギー分解能とダイナミックレンジで、試料を選ばずバックグラウンドデータ測定を実現しました。
- ・**全てのX線波長に対応** 検出器自動調整ソフトにより、各種X線波長に加え、測定目的（強度優先、P/B比優先）に適合した動作モードを選択することが出来ます。
- ・**微小検定** 微小検定光学系との併用で、微小検体の高速測定が可能です。

海外の大学
AGH Uni. of Sci. & Tech.
(Poland) 共同開発

エネルギー分解能 $1/20\%$
128 channels
計測率 1000 cps
読み出し時間 0.2 msec
ASCの性能による
40%、40万 cps 青色色仕

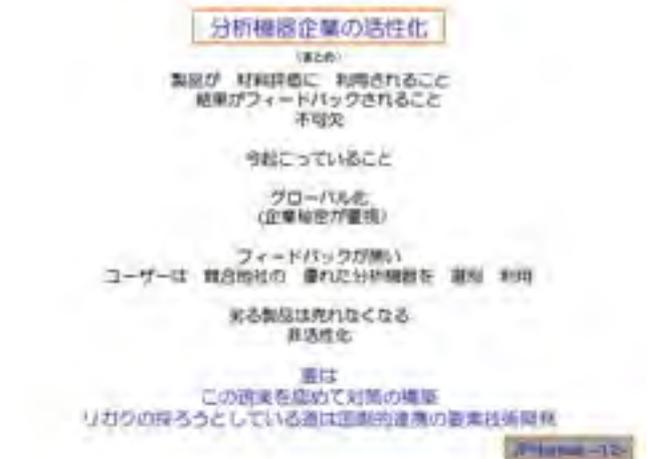
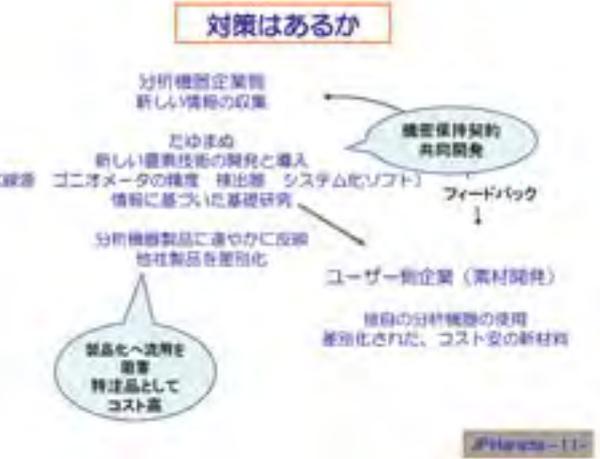
JPRNews-9

PILATUS100K

- X線用の2次元検出器
- スイスの Paul Scherrer Institute がSLS（スイス・ライトソース；放射好設備）用の検出器用として開発した2次元半導体素子検出器 → Detectris LTD, (Next generation X-ray Detectors)
- Area: 83.8 x 33.5 mm² 未だ小型
- Counting rate: 2 x 10¹⁰ cps
- Reading out time: 5 msec / one picture
- Energy resolution: 500eV

ホームページに掲載されている

JPRNews-10



教育の問題

この問題は単に
材料開発企業と分析機器製造企業の
間の問題ではない
復活させるには教育の問題に関わる

分析機器 利用法
その開発研究は、大学、研究所等、教育機関で軽視され
費用が膨大、研究費が薄く、
論文のインパクトが低い
これはグローバル化したための現状

分析機器開発に専任を持つ者が著減

対策は考えられているか
有識者やマスコミによる評価を上げることも必要

単なる保護主義の為でなく、我が国の技術のグローバル化を目指す

ご静聴を感謝します

原田仁平

<harada@rigaku.co.jp>

©Rigaku-18

©Rigaku-14

JST研究開発戦略センター主催
 解題ワークショップ
 基幹産業のニーズに答える汎用計測の革新的技術

核磁気共鳴NMR

JST先端計測技術推進部開発総括
 本河 光博

〒100-0001 東京都千代田区千代田1-10-1

核磁気共鳴NMR

生命科学から物性物理まで
 非常に汎用性の高い計測法

ここでは、構造生物学や高分子化学に有用な

高分解能NMR を取り上げる

1. 背景

NMR(Nuclear Magnetic Resonance)

原子核に付随する核磁気モーメント
 磁場中で歳差運動を行う



$$\omega = \gamma B$$

プロトン(1H)の場合 42.6 MHz @ 1 T

物質の中では相互相互作用があって、スペクトルに構造を持つ
 測定数および磁場が強いほど分解能がある
 国際的競争にある マグネットの性能による
 現在の最高

Bruker & Oxford 950 MHz @ ~22 T
 JEOL, JASTEC 930 MHz @ ~22 T



世界の潮流 1GHz @ 24 T をめざす

ちなみに どんな外形でどんな大きさか

物質材料研究機構(NIMS)の装置

JEOL, JASTEC 930 MHz @ ~22 T



写真 NIMS 本宮尚徳氏

2. 世界の状況

1) 世界で高分解能NMRを作っているメーカー

システム	マグネット	機材
Bruker	Bruker	JASTEC+EAS
Varian	Varian(旧MagneX)	JASTEC+EAS+Oxford(米)
日本電子	JASTEC	JASTEC

BrukerとVarianはマグネットは自社製
 日本電子はJASTECから購入

VARIANは、従来Oxfordからマグネットを購入していたが、
 1年半前にMagneX社を買収し内作方針に切り替えた。
 従って、Oxfordはこの分野から事実上撤退した形になっている。

他に水分分析のみ(マグネット無し)を販売している小さな会社はいろいろあるが、世界のシェアはほぼこの3社

2) シェア

システムのシェアがそのままマグネットのシェアになっている

システムシェア
 Bruker: 55%, VARIAN: 35%, 日本電子: 10%

日本国内シェア
 Bruker: 45%, VARIAN: 30%, 日本電子: 50%

世界シェア
 Bruker: 60%, VARIAN: 30%, 日本電子: 10%

製研の場合

400MHz	1台(国産)
500MHz	1台
600MHz	17台
700 MHz	6台
800 MHz	14台
900 MHz	3台

国産6台

他はBruker

マグネットシェア

Bruker: 35%、VARIAN: 35%、JASTEC: 10%

材料についてはJASTECは全社に供給

材料シェア

(AS:国産): 35%、Oxford SC: 30%、JASTEC: 45% 程度

【マグネット】

Brukerはマグネットを自社で生産している。
VARIANも最近マグネックス社というメーカーを買収し、自社化した。

しかし、前任導磁石に使用している超伝導線はJASTECが供給している。
Bruker社へは高磁場用の線材を、VARIAN社へは線材全てを供給している。

線材においてはJASTEC社が一歩リードしている。
前任導磁石の性能については各社一長一短があるが、トータル性能としてJASTEC社が優れているとはいえない。技術的には上回っている部分も多い。たとえば高磁場900M・50Mを4.2Kで運転出来るが、Brukerは2.7Kで運転しないと性能が出ない。このため余計なコストと機器が必要になる。
しかし、ここでBruker社の販売戦略は非常にうまく、常に新製品を無差別にイメージがある。自社でマグネット部門を持っているため納期分売計と超伝導磁石が一括となった開発や販売戦略を行う事が可能である。

日本国内では日本電子は強みを見極めるが、世界的にはそのシェアは3番目となりBruker社がかなりの強みを見極めている。

理由

【技術力】

技術そのものにあまり差はない。しかし、顧客にかける人と資金は世界のシェアと同じような比率であると感ぜられる。
開発人員の数はBrukerは日本電子の10倍とも言われている。
このため、日本電子の製品ラインナップはBrukerに少し遅れを取っている。赤字の運搬も日本より早くにBrukerは手がけており、5本も製品に結びついている。日本電子もここに来て赤字運搬による開発が行われ始めたが、開発人員に余裕がない。

【販売戦略】

海外でシェアを伸ばしていくのが課題。販売人員の増加、強化を図りつつあるが、すでに80%のシェアを持っているBrukerの牙城を崩していくのは簡単ではない。

新しい市場の開拓、自社にはない特徴ある製品を開発販売していくのが早速だが、国内市場シェアの確保などのため、やはり開発人員の余裕がない。また、Brukerに比べWebなどを利した技術資料やNMR関連情報の発信がうまくできていない。
さらにBrukerは新製品の投入の仕方が非常にうまく、ほとんど内容の変更らないものをデザインなどを改良製品として発表している。常に新しいものを開発している。というイメージが生まれ上がっており、この辺りも日本電子は学ぶ点があると思える。

3. JST先端計測分析技術・機器開発事業の取り組み

1) 1GHzへの挑戦

「超1GHz NMRシステムの開発」

本吉 司	物質・材料研究機構 (NIMS)
深田 泰	神戸製鋼 (JASTEC)

2) 超高感度への挑戦

「高品質新用超高感度ナノヘルツ級NMR装置」

高橋 敏道	阪大素自官研究所
沢井 孝弘	日本電子
山崎 敏孝	福岡大学

1) QM への挑戦

「超10GHz NMRシステムの開発」

本吉 司 澤田 隆

物質・材料研究機構 (NIMS) 神戸製鋼 (JASTEC)

目標の目的は、24 T の超伝導磁石の開発

22 T 超伝導磁石の中にブラスターコイルをいれて γ のかさ上げを行う

住友電工で開発された Bi 系高温超伝導線をつかう

一般に高温超伝導線は H_c は高いが J_c が小さい

住友電工の線は

- (1) 約 1 mm^2 の断面積の線材で飽和電流 (77K) が 200 A と従来の 2 倍に改善
- (2) 機械的特性が 2 倍以上と軟鋼線並みの強度、
- (3) 歩留りが工業製品として確認できるまでに向上
- (4) 線長が 1,800 m 以上と大幅に改善

しかし、問題点は

永久電流モードにできないので、外部電源とつなぐ
十分安定な外部電源が必要

外部電源をつなぐことから経済的に商品価値があるかどうかは明確でない
NIMS で共同利用なら可能

2) 超高感度への挑戦

「蛋白質結晶用超高感度テラヘルツ NMR 装置」

藤原 敏道 穴井 孝弘 出原 敏孝

阪大蛋白質研究所 日本電子 および福井大学

方法 Dynamic Nuclear Polarization (DNP)

ドーパした自由基の電子スピン共鳴とカップルさせて二重共鳴させ、核スピンの分極率を大きくする。

分極率が大きいと、核モーメントの平均値が大きくなって収取量が増える。

DNP のもう少し詳しい説明は次



$$\omega_N = \gamma_N B \quad \omega_e = \gamma_e B$$

$$\gamma = \frac{g\mu}{2m} \quad \text{なので } \gamma_N \text{ と } \gamma_e \text{ は}$$

符号が逆で大きさが約 1800 倍異なる

$$g_N = 2.8 (\text{proton}) \quad g_e = -2$$

電子スピンは γ が負なので磁場と逆方向に
(磁気モーメントは正になる様に定義してある)

γ が飽和していることが重要

γ が飽和すると ω と J の相互作用のため J がのびる

J が 1000 倍大きくなると感度が 1000 倍高くなる



$$\omega_e = \gamma_e B \quad \omega_N = \gamma_N B$$

同じ磁場で電子スピンを飽和させ、核スピンの共鳴を観測する二重共鳴
装置の装置 $\omega_N = 600 \text{ MHz}$ (at 14 T)

この磁場での電子スピン共鳴の周波数は $\omega_e = 394 \text{ GHz}$

194 GHz の大強度電磁波を発生する装置が必要

福井大学のジャイロトロンを使う

これが成功すると感度は約 1000 倍になる予定

世界中で関心が高い

(2007 年 8 月 29 ~ 31 日 Nottingham 大学でシンポジウム)

Dynamic Nuclear Polarization Symposium 2007

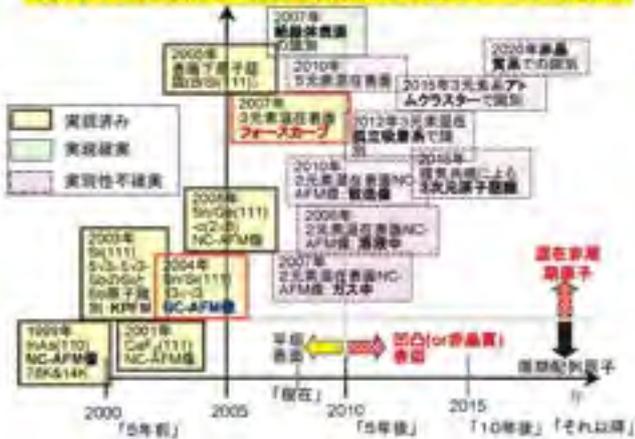
organized by

British Radiofrequency Spectroscopy group & J1-DNP Consortium

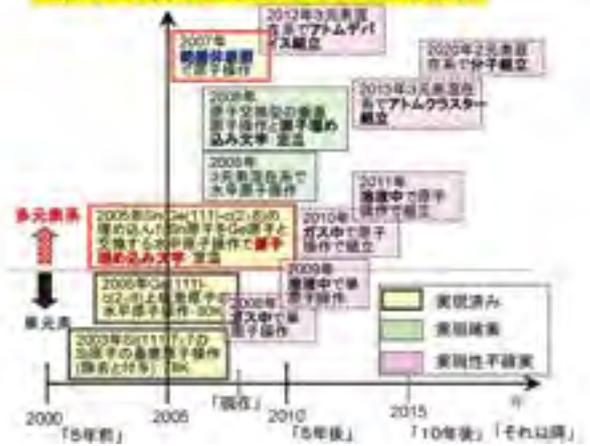
日本も急ぐ必要がある

しかし完成しても価格は高いだろう 商品価値は?

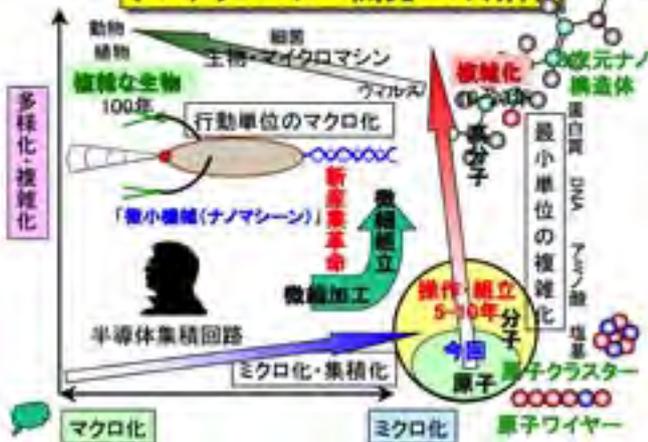
原子の認識・区別・識別の未来: AFM利用



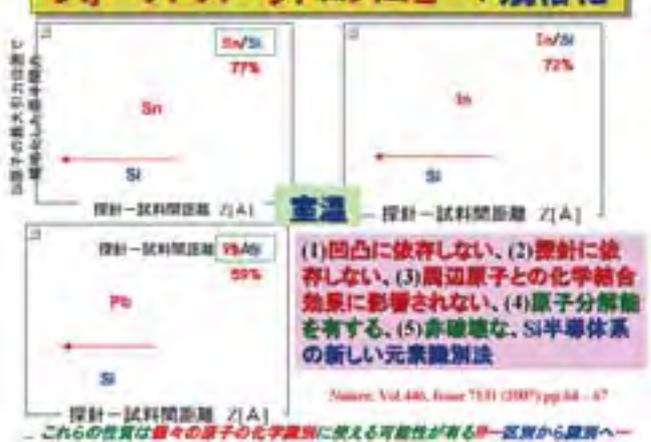
原子の操作の未来: AFM利用



ナノテクノロジー開発への期待

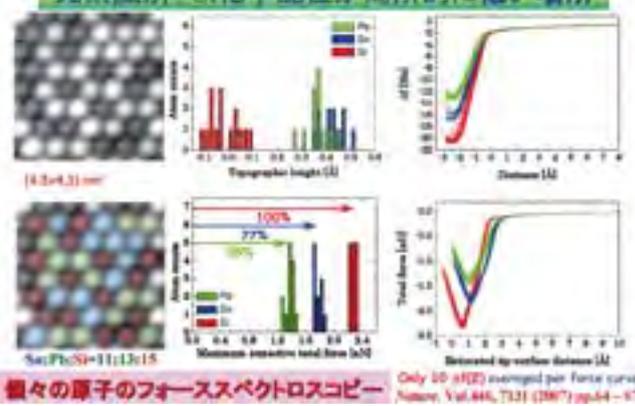


フォース・スペクトロスコピー: 規格化

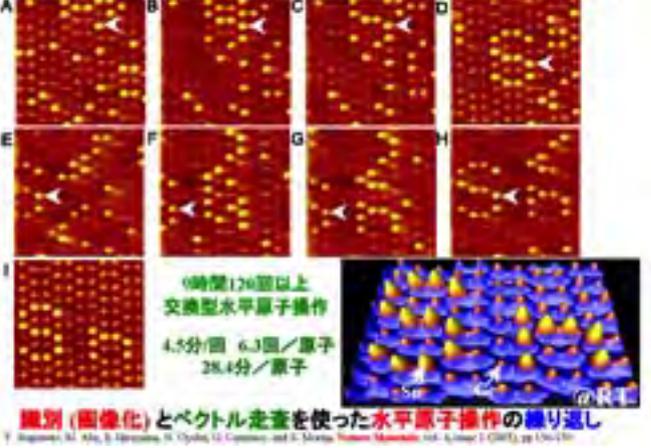


Sn, Pb/Si(111)-(√3x√3)の3元素元素識別

元素識別 - Si化学配位が局所的に低い場所



原子埋め込み文字(Atom Inlay)製作過程



比較表(バイオAFM計測) by 新潟大学 平本 勇

国	研究機関	研究内容	特徴	研究内容
日本	新潟大学	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析
	東京大学	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析
	京都大学	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析
米国	スタンフォード大学	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析
	MIT	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析
	ハーバード大学	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析
欧州	オックスフォード大学	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析
	ETH Zurich	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析
	Max Planck Institute	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析
中国	中国科学院	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析
	清华大学	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析
	北京大学	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析
韓国	KAIST	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析
	POSTECH	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析
	SKKU	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析

比較表(バイオ分野)

国	研究機関	研究内容	特徴	研究内容
日本	東京大学	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析
	京都大学	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析
	大阪大学	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析
米国	スタンフォード大学	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析
	MIT	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析
	ハーバード大学	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析
欧州	オックスフォード大学	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析
	ETH Zurich	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析
	Max Planck Institute	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析
中国	中国科学院	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析
	清华大学	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析
	北京大学	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析
韓国	KAIST	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析
	POSTECH	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析
	SKKU	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析	細胞膜のAFM計測による細胞の力学特性の解析

バイオAFM計測全体コメント:

近年カーブ測定バイオAFM計測技術を利用してタンパク質やDNAを単一分子レベルで解析し、その内部構造を力学的に破壊する過程の延伸距離と強力の関係を記録することにより、分子内部の原子間相互作用を理論的に解析する研究はドイツ、イギリス、アメリカ、日本で盛んに行われている。タンパク質機能発現に必要な立体構造形成の原理は未だ理論的アプローチの困難な課題として残されているので、単一分子計測からの新規データの取得から新しい知見が得られることが期待されている。また、市販原子間力顕微鏡装置もこの目的を達成を援助する方向で年々改良が加えられた新型機が発表されている。

バイオAFM計測に目を向けると、細胞機能の力学的制御あるいは操作が有望なテーマとして波及されている。この分野では、ドイツおよび日本において活発な研究が多い。医用高分子材料と人体組織あるいは人体タンパク質成分との適合性や、微小粒子と細胞の相互作用測定など新しい医療、ナノ材料医療上の新しい問題などを解明するためにはナノスケールでの計測が不可欠な手段となっており、研究分野全体として、物理学、化学、材料科学、生化学、細胞科学、医学、工学など多くの知識と技術が必要とするので、今後の教育、研究環境における学際的な研究が極めて重要となる。イギリスを始めとして、海外では物理学教育を受けた人材の一部に医学・生化学分野への進出を誘導する教育を重視し始めている点に留意。今後日本でもこのような分野への物理学者の貢献が大きいと期待されるので、学際性の高い生体計測およびこれを基にした医療診断開発を主目的とする研究機関の創設が望まれる。

バイオAFM開発関連: Veeco社(アメリカ)、JPK社(ドイツ)、アサイラム社(アメリカ)、Molecular Imaging社(アメリカ)、SILナノテクノロジー(日本)などが活発に生体測定用AFM開発を行っている。Oy 東京工業大学 後藤 真

比較表(高分子AFM計測) by 東京工業大学 中嶋 洋

国	研究機関	研究内容	特徴	研究内容
日本	東京大学	高分子のAFM計測による力学特性の解析	高分子のAFM計測による力学特性の解析	高分子のAFM計測による力学特性の解析
	京都大学	高分子のAFM計測による力学特性の解析	高分子のAFM計測による力学特性の解析	高分子のAFM計測による力学特性の解析
	大阪大学	高分子のAFM計測による力学特性の解析	高分子のAFM計測による力学特性の解析	高分子のAFM計測による力学特性の解析
米国	スタンフォード大学	高分子のAFM計測による力学特性の解析	高分子のAFM計測による力学特性の解析	高分子のAFM計測による力学特性の解析
	MIT	高分子のAFM計測による力学特性の解析	高分子のAFM計測による力学特性の解析	高分子のAFM計測による力学特性の解析
	ハーバード大学	高分子のAFM計測による力学特性の解析	高分子のAFM計測による力学特性の解析	高分子のAFM計測による力学特性の解析
欧州	オックスフォード大学	高分子のAFM計測による力学特性の解析	高分子のAFM計測による力学特性の解析	高分子のAFM計測による力学特性の解析
	ETH Zurich	高分子のAFM計測による力学特性の解析	高分子のAFM計測による力学特性の解析	高分子のAFM計測による力学特性の解析
	Max Planck Institute	高分子のAFM計測による力学特性の解析	高分子のAFM計測による力学特性の解析	高分子のAFM計測による力学特性の解析
中国	中国科学院	高分子のAFM計測による力学特性の解析	高分子のAFM計測による力学特性の解析	高分子のAFM計測による力学特性の解析
	清华大学	高分子のAFM計測による力学特性の解析	高分子のAFM計測による力学特性の解析	高分子のAFM計測による力学特性の解析
	北京大学	高分子のAFM計測による力学特性の解析	高分子のAFM計測による力学特性の解析	高分子のAFM計測による力学特性の解析
韓国	KAIST	高分子のAFM計測による力学特性の解析	高分子のAFM計測による力学特性の解析	高分子のAFM計測による力学特性の解析
	POSTECH	高分子のAFM計測による力学特性の解析	高分子のAFM計測による力学特性の解析	高分子のAFM計測による力学特性の解析
	SKKU	高分子のAFM計測による力学特性の解析	高分子のAFM計測による力学特性の解析	高分子のAFM計測による力学特性の解析

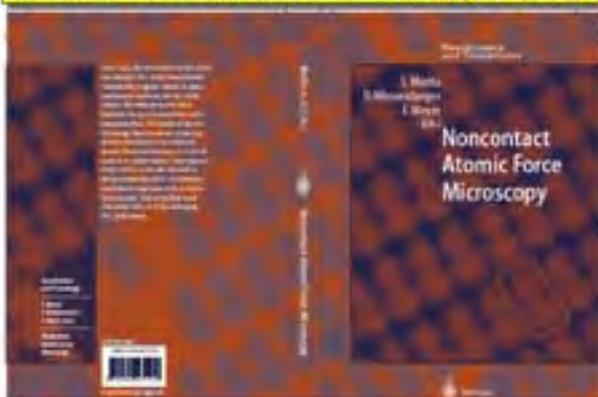
比較表(液中SPM計測) by 京都大学 山田 智文

国	研究機関	研究内容	特徴	研究内容
日本	京都大学	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析
	東京大学	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析
	大阪大学	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析
米国	スタンフォード大学	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析
	MIT	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析
	ハーバード大学	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析
欧州	オックスフォード大学	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析
	ETH Zurich	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析
	Max Planck Institute	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析
中国	中国科学院	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析
	清华大学	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析
	北京大学	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析
韓国	KAIST	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析
	POSTECH	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析
	SKKU	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析

比較表(デバイス開発/KFM等SPM電気計測) by 京都大学 山田 智文

国	研究機関	研究内容	特徴	研究内容
日本	京都大学	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析
	東京大学	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析
	大阪大学	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析
米国	スタンフォード大学	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析
	MIT	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析
	ハーバード大学	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析
欧州	オックスフォード大学	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析
	ETH Zurich	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析
	Max Planck Institute	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析
中国	中国科学院	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析
	清华大学	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析
	北京大学	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析
韓国	KAIST	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析
	POSTECH	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析
	SKKU	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析	溶液中でのAFM計測による分子の力学特性の解析

非接触原子間力顕微鏡法 (NC-AFM) の最初の専門書



Citation 170 S. Morita, R. Wiesendanger and E. Meyer (eds.), "Noncontact Atomic Force Microscopy", Springer, NanoScience and Technology, 10月中旬 (2002) pp.1-439 [約3年]

基幹産業（素材、土木、建設、輸送、機械、エネルギー等）の
ニーズに答える汎用計測の革新的技術

質量分析装置

大阪大学大学院理学研究科物理学専攻
豊田 岐 聡

JST 企画ワークショップ 2008年11月12日

内 容

- 質量分析とは
- 質量分析の国内外の動向
- 近年開発された技術紹介
- 今後の課題

質量分析とは

質量分析(mass spectrometry)とは、質量分析装置(mass spectroscopy)を用いてイオンの質量電荷比と強度を測定する。

質量分解能: $\frac{m}{\Delta m}$

質量分析とは

質量分析(mass spectrometry)とは、質量分析装置(mass spectroscopy)を用いてイオンの質量電荷比と強度を測定する。

分子の構造解析

- 元素の組成比
- 化合物の構造解析
- タンパク質・ペプチドのアミノ酸配列
- タンパク質などの立体構造

高感度
(ピコグラム、フェムトグラムで測定できる)

定量分析

- 自然界や生体内に存在する化合物の定量
- 医薬品や代謝物の体内での分布状況解析

→ 化合物の同定

質量分析装置とは

原子分子をイオン化
電子イオン化、化学イオン化、高電圧電子衝撃イオン化、マトリックス支援レーザー脱離イオン化、エレクトロスプレーイオン化など

電磁場中を飛行
磁場型、四極棒型、イオントラップ型、飛行時間型、フーリエ変換イオンサイクロトロンなど

質量による運動の違いにより
イオンの質量を測定する

イオン源

分析部

検出器

真空排気

質量分析

化学
化合物同定、
化学反応

物理
核反応、原子・
分子、クラスター
形成

宇宙地球
惑星探査、
隕石分析

安全・安心
食品、環境、
医薬品

考古学
年代測定

農学・環境
農産物、環境分析、
食品

医学
プロテオーム、
糖質、脂質、
核酸、代謝

生物学
タンパク質・ペ
プチド解析、
天然物分析

イメージング質量分析の2つの手法

プローブ走査方式

プローブ走査方式は、プローブを走査しながら、その位置に応じた質量分析を行う。高解像度のイメージングが可能。

イオン群光学像投影方式

イオン群光学像投影方式は、大口径のイオンビームを照射し、その位置に応じた質量分析を行う。広い面積のイメージングが可能。

両方とも、空間の収束性が重要。

CREST「超高分解能超高速イメージング質量分析装置（質量顕微鏡）」の概観。

CREST超高分解能超高速イメージング質量分析技術（質量顕微鏡）の概観

投影型イメージング質量分析とは？

イオン源から発生したイオンは、電場・磁場によって加速・偏転され、試料面に照射される。試料表面から発生した二次イオンは、再び電場・磁場によって加速・偏転され、検出器で検出される。

MULTUMについて

MULTUMは、4つの磁極を用いた超高速の質量分析装置。高質量数のイオンも検出される。

イオン源と検出器の位置関係を示す図。

JST 先端計測分析技術・横断的専攻 「超微細質量分析装置の開発」

高解像度のイメージング質量分析装置の開発。試料表面の微細な構造を解析するための装置を開発。高解像度のイメージング質量分析装置の開発。

プローブ走査型イメージング質量分析

Microscope, Laser, Ion transfer, Data processing, XYZ stage, goniometer, TSP1, TSP2, m-TOF.

試料表面およびイオン化の大気圧：1号機(2005年12月完成)、2号機(2006年4月稼働)、2007年度以降

高分解能Digital Ion Trap (DIT)

超高速質量分析装置 マルチターンTOF (m-TOF)

科研費 学術創成研究員「感度増進用超高速検出器質量分析システムの実現」

今後の質量顕微鏡ミッションで地球に持ち帰られる微量な宇宙試料の解析（元素分析・同位体比測定）を目指す

TOF-SIMS プローブ走査型イメージング質量分析

MULTUM、GaN基底のイオン銃（エミフィアード/アノード/カソード）、高圧電源（1×10⁶ V）、検出器（スプレッドング検出器）、空間的同期化、超高速検出器（TOF）、フェムト秒レーザー（λ = 785 nm, 40 - 120 fs, 2.5 mJ/pulse）

超高速検出器のイオン化により、高質量数のイオンも検出される。

今後必要な事

① 装置

- 革新的な装置を開発する。
 - 「革新的な装置を開発する」として、世界をリードできるような革新的な装置を開発する。
 - 新しい技術は、突然出るものではない。
 - 経験とノウハウと知恵とゆっくりと考える時間的余裕が必要！

② 組織的なマネジメントの観点

- 応用範囲は非常に広い。学術的な領域での取り組みが必要。
 - ハード、ソフトの開発者が一堂に集まった組織が必要
 - 質量分析センターのようなものがあるといいのでは、お互いが深く理解できるような機会を設けなければならない！
 - 巨大質量分析シンポジウムはその目的のため

③ 人材の育成

- 世界的な超微細計測の人材不足を解消する必要がある。特に物理のバックグラウンドは不可欠。
 - 超微細計測に興味をもつような教育方法の発案が必要
 - ハードからソフトまで広範囲に教育できるような組織が必要
 - 若手人材の育成が必要。他の近い分野を経験したポストドクなど。

科学技術シーズを産業につなぐための先端計測
平成20年5月12日

新しい原理によるTHzテクノロジー

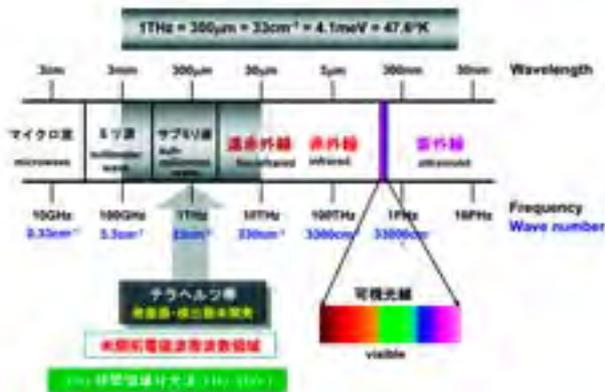
福井大学産外領域開発研究センター
安岡義純

1. (財)テレコム先端技術研究支援センター
"テラヘルツテクノロジー動向調査報告書"(2006.3)
2. (株)日本学術振興会
"テラヘルツ波による物質・生命の科学と応用"
(2005.4-2008.3)

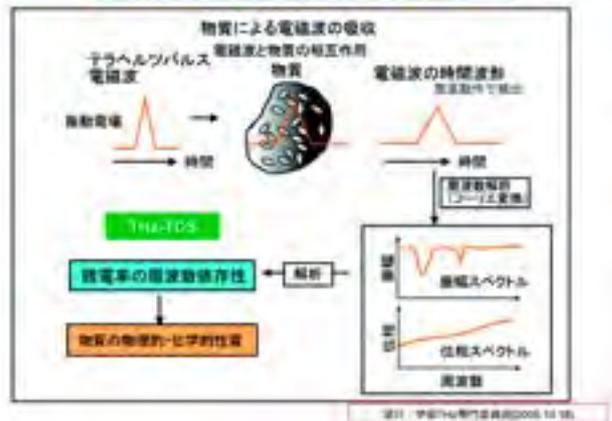
講演内容

- 序論(テラヘルツとは)
- テラヘルツ時間領域分光法(THz-TDS)法
- テラヘルツイメージング
- 今後の展望

テラヘルツ領域とは

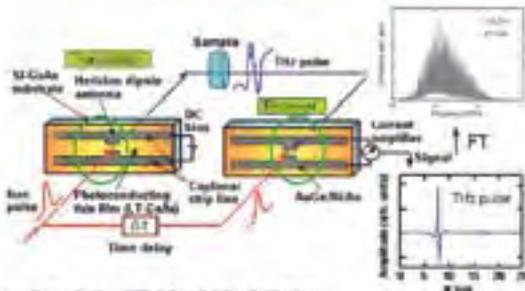


テラヘルツ帯の新しい計測法



光子系アンテナによるTHzパルスの発生・検出

「テラヘルツ光子系」にエッジの鋭いパルス



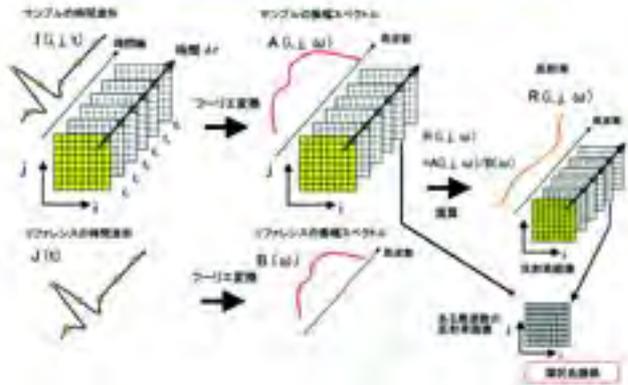
THz 時間領域分光法(THz-TDS)の特長

- 常温測定でしかも高いS/N
- 振幅と位相
従来の分光装置で計測されるのは光の強度に関する情報。THz-TDSでは電磁波の波形そのものを計測。
- 超広帯域
広帯域の周波数スペクトルを短時間で観測できる(図を参照)
- 超高速時間変化に対応

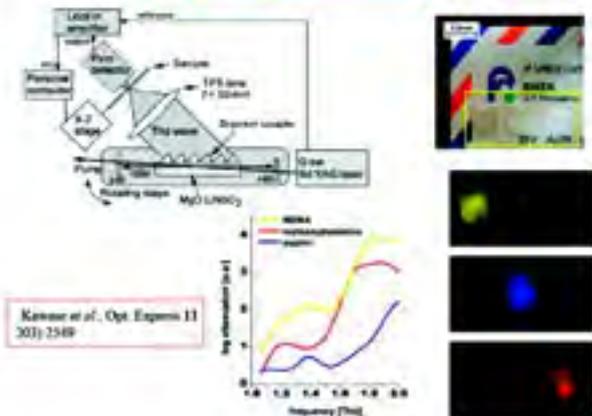
THz波の特徴

- 水分に敏感（吸収大）
- プラスチック、紙、ゴム、繊維、木材、乾燥食品、脂肪、半導体、誘電体等、可視域で不透明な多くの物質を透過する。
- 近赤外光よりもレイリー散乱の影響を受けにくいので、粉体を透過する。
- X線に比べて人体への安全性が高い（X線の100万分の1の光子エネルギー）
- 多くの気体や液体や固体物質の振動単位や回転単位がテラヘルツ帯にあり、その物質固有の吸収線を有しているため、テラヘルツスペクトルを測定することによって、物質を特定できる。

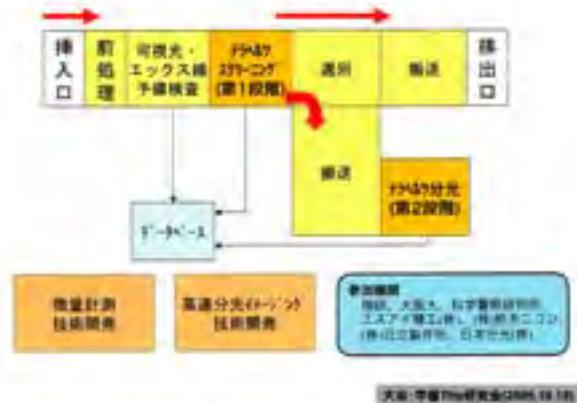
テラヘルツ分光画像を得るためのデータ処理



封筒中の違法薬物の検査



空港における封書検査装置



Compact continuous-wave subterahertz system for inspection applications

Nikolay Karapovits, Hui Zhang, Cunli Zhang, Kwang-Lin Li, Jian-Sheng Huang, Jingfeng Xu, and X.-C. Zhang
 Center for THz Research, Research Electronic Institute, Inc, 400 Bell Court
 (Received 11 January 2006; accepted 1 December 2006; published online 28 January 2007)
 We report the use of a compact continuous-wave sub-structures system for inspection applications using electronic generation and detection methods. A combination of a $\text{GaAs}_x\text{Sb}_{1-x}$ diode, a submillimeter wave detector, and a photonic band structure provides narrow-band images at 0.2 cm⁻¹ with a 100-μm resolution. Examples of the measurement of NASA's (protection panel) and applicability of the technology in other semiconductor manufacturing applications are presented and discussed. © 2007 American Institute of Physics [DOI: 10.1063/1.265701]



THzエレクトロニクス応用の分野



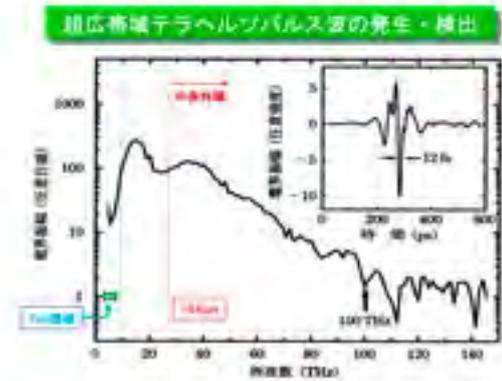
今後の展望

1. 実用化に向けての研究開発

- 各種材料や化学物質のスペクトルデータベースの整備
- 解析ソフトの開発・充実
- 信頼性が高く、安価で簡便に測定できる分光システムの構築

2. 測定法・解析法の探求から目標を定めた応用への挑戦へ

3. 高輝度光源(レーザー光源)及び高感度検出器の開発



10 fs のパルス幅をもつチタンサファイアレーザーを使用した場合の伝送率スペクトル

W. Ashwin, S. Ota, Y. Shimozono, S. Ito, S. K. Saha and T. Funo, SPIE, CLBO, pp. 1-8 (2005).

プラズモニクス

科学分野—金属と光の相互作用
 フォトン+電子
 +フォース (反接効果)
 +化学 (銀体、電子移動)

現象・効果—ナノ効果
 (サイズ+メソ+量子)

産業分野—
 近接場顕微鏡 (ナノ)
 分光分析 (増強感度)
 感測器、物理診断
 センサー (バイオ)
 x 発光素子、太陽電池
 x ナノ回路
 x メタマテリアル
 (新機能性材料)

光子と金属
 光の反射体：鏡

金属=自由電子の海
 自由電子の集束的振動
 =表面プラズモン

metal

surface plasmon

光子と金属
 光の反射体：鏡

その折光係数
 プラズモニックデバイス

ナノ構造

metal

plasmon

ナノ構造・ナノ空間
 共振・電場増強
 可視・近赤外
 表面・界面

プラズモニック・
 バンドギャップ・レーザー

Dispersion curve

DCM fluorescence spectra

AFM image

プラズモンの歴史

1908 Mie
 金属微粒子の散乱理論

1904 Maxwell-Garnet
 金属微粒子の光物性

1902 Robert Wood
 網折格子のアノマリー

1899 Sommerfeld
 金属純線の導波線

theoretically predicted existence of surface waves along a metallic wire.

金属ナノレンズ

Localized hotspot

Image

Object

nano-lens

plasmon resonant molecule

(1) enhancement of the output signal intensity ($\times 10^3$)
 (2) nano-resolution (40nm; root pitch)
 both due to the localized SPP of nano-rod



of these bands for three different angles of incidence. It will be observed that they are all shifted on passing through the position of perpendicular incidence.

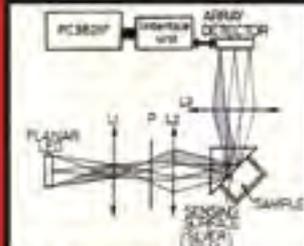
It is impossible to identify these bands with those observed with the grating in air, since the junction in the refractive index of the medium in which the grating is immersed is too great. To determine the effect of increasing the refractive index of the medium on the position of a given band I inserted a plate of glass in front of the grating at a distance of about 0.2 mm from the top surface. Water was introduced between the two, and a stream of water was applied to the lower edge. The incident light gradually moved up over the water, and I observed the dark bands slowly moved, on looking at the spectrum directly to the grating, without the aid of a telescope, the shift being towards the red, as the refractive index increased. The appearance of one of the bands is shown in Fig. 2. It will be observed that the shift is in the same direction as when a microscope is focused on a surface of high refractive constant, and through there may be an connection between the two phenomena, it seems perhaps worth while to mention it as there may be something able to contribute to the solution of this question.



1992
Richard Wood
アノマリー

Atkinson & Kevita Appl. Spectrosc. 1989
Matsuda & Kevita Appl. Opt. 1988

表面プラズモン化学生センサー
(water contamination in process)



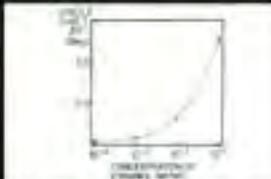


Fig. 4. Schematic diagram of the developed system.

Fig. 5. Relationship curve for angle with increasing of refractive index in water.

1992年商品化 (特許は86年)

SPECIFICATION SHEET **DKK**

SPRセンサー SPR-20型

9324-005

本装置は表面プラズモン共振 (Surface Plasmon Resonance) 現象を利用した高精度な分光センサーで、本装置はコンピュータ制御された測定システム、検出器と増幅器から構成されています。



2光子と表面増強プラズモン共鳴
(超高精度・分光センサー)
表面増強プラズモン共鳴
(赤外分光・北大大教授)

Kawai, Kevita, Opt. Lett. 1986
Kawai & Kevita Appl. Opt. 1984

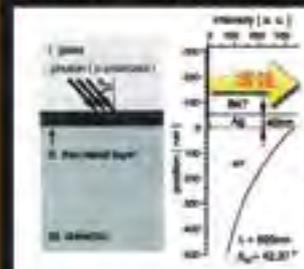
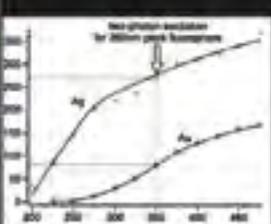



Fig. 1. Schematic configuration for excitation of surface plasmon resonance by two-photon resonance scattering. The exciting light is transmitted in direction as shown in a second set of two lenses placed in the figure.

Fig. 2. Calculated refractive index of silver film of thickness 100 nm versus two-photon resonance wavelength. The exciting light is transmitted in direction as shown in a second set of two lenses placed in the figure.

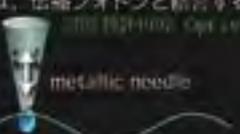
3. Kevita, Matsuoka and Tachibana, and Surface Plasmon Resonance, Springer, Tokyo, 2001

短い光の金属の表面 (表面プラズモンポラリトン) ナノイメージング



短い光 - 伝播光と結合しない
遠くから見えない (近接場光学)

波長より十分小さな金属微粒子は、伝播光子と結合する局在化SPP (アンテナ共鳴)



metallic needle

11

Atkinson & Kevita Appl. Opt. 1989 (11) 2, Opt. Lett. 1987, Opt. Lett. 1988

金属針による近接場顕微鏡の発明 (1992)
金属チップによる局在プラズモンポラリトン励起
光子の閉じ込め & 電場増強



金属チップ
3次元電場計算(FDTD)
銀チップ (~30nm)

ナノスポット

80

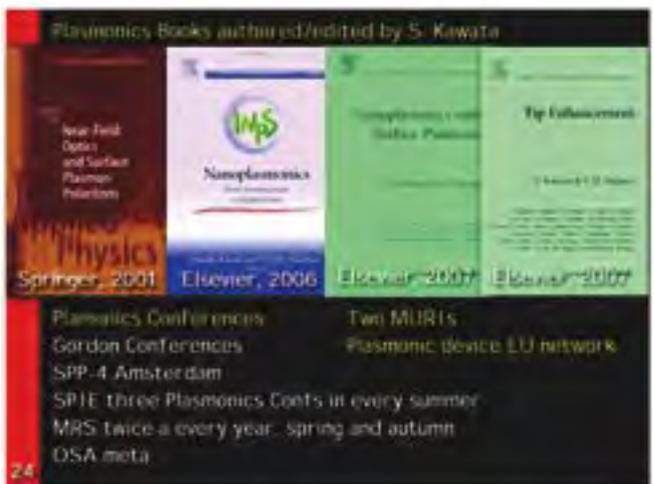
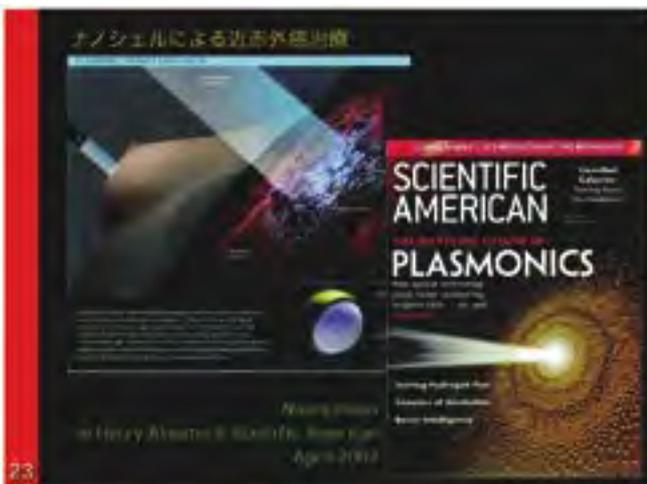
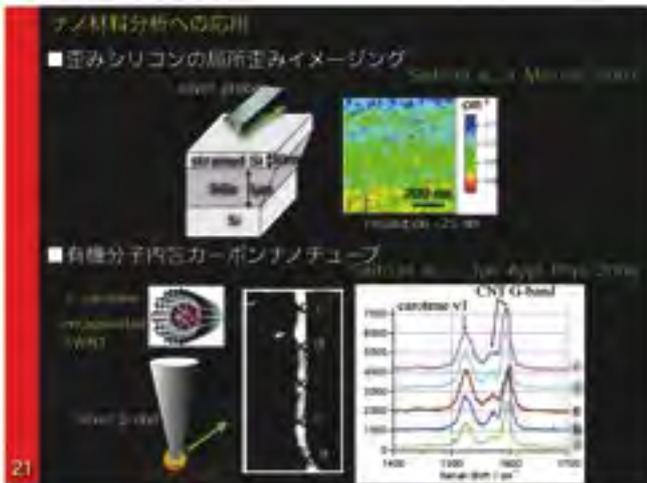
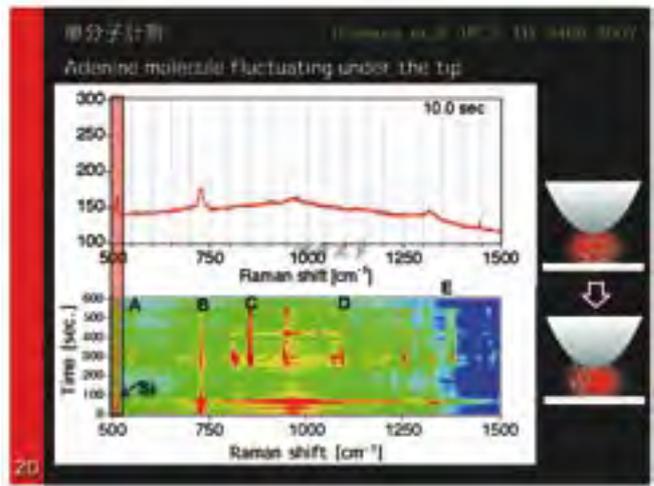
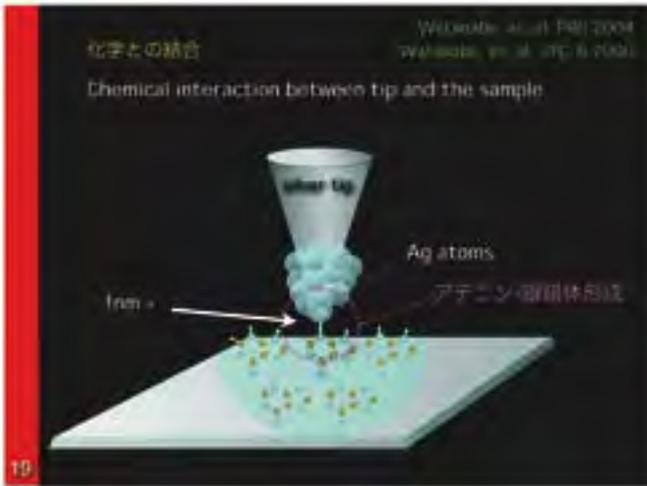
250nm

250nm

0nm

回折限界スポット

12



イオンビーム分析
 京都大学 工学研究科
 木村健二

Outline
 イオンビーム分析の現状
 高分解能RBSを例に
 イオンビーム分析の課題
 ナノレベル3次元分析
 他の分析法との複合化

高分解能ラザフォード後方散乱法

Simple and Compact: 4.5 m (L) × 2.5 m (W) × 1.7 m (H)

400 kV accelerator
 $D = 0.1 \text{ m}, h = 1.7$

400 keV He^+ beam: 40 nA at $2 \times 2 \text{ mm}^2$
 Typical measuring time = 10 min

400 keV He^+ beam: 40 nA at $2 \times 2 \text{ mm}^2$
 Typical measuring time = 10 min

定量的な良い組成分析
 非破壊分析
 深さ分解能 $\sim 0.2 \mu\text{m}$
 測定時間 ~ 10 分
 試料の前処理不要
 ひずみの深さ分布測定可能
 水素の分析もERDAと一緒に可能

1原子層の深さ分解能

DEPTH FOR Pb (nm)
 300 keV He^+ on PbSe(111)

300 keV He^+ on PbSe(111)

Counts vs ENERGY (keV)

PbSe(111)

Top layer is a Pb layer.
 Atomic density of the top layer is $\sim 1/3$ of the bulk density.

深くなるほど深さ分解能劣化
 Energy loss straggling

イオン液体: TMPA-TFSI

$[(\text{CH}_3)_3\text{N}^+\text{-C}_4\text{H}_9]^-$
 $[(\text{CF}_3\text{SO}_2)_2\text{N}]^-$

400 keV He^+ → TMPA-TFSI ($\text{C}_{10}\text{H}_{16}\text{F}_4\text{N}_2\text{O}_4\text{S}_2$)

Counts vs ENERGY (keV)

$\theta = 2.9^\circ$
 $\theta = 5.18^\circ$
 $\theta = 7.4^\circ$

**イオン液体 (TMPA-TFSI):
 陰イオンが表面で特定の向きをとる**

NORMALIZED YIELD (arb. units) vs DEPTH (nm)

S (x4)
 F
 O

高分解能RBS:長所と欠点

- 非破壊分析
- 定量的の良さ
- 深さ分解能 表面で $\sim 0.2 \text{ nm}$
 ただし、深くなると劣化
- 比較的短時間の測定 (~ 10 分)
- 試料の前処理不要
- 横方向の分解能が悪い (3次元分析の要求)
- 軽元素の感度は悪い \rightarrow ERDA
- 深くなると分解能劣化 \rightarrow sputtering
- 化学状態の分析は不可能
- 多重散乱の影響 \rightarrow improvement of simulation



高分解能RBS:長所と欠点

- ・非破壊分析
- ・定量性の良さ
- ・深さ分解能 表面で~0.2 nm
ただし、深くなると劣化
- ・比較的短時間の測定 (~10分)
- ・試料の前処理不要

- ・ **横方向の分解能が悪い (3次元分析の要)**
- ・ 軽元素の感度は悪い → ERDA
- ・ 深くなると分解能劣化 → sputtering
- ・ 化学状態の分析は不可能
- ・ 多重散乱の影響 → improvement of simulation

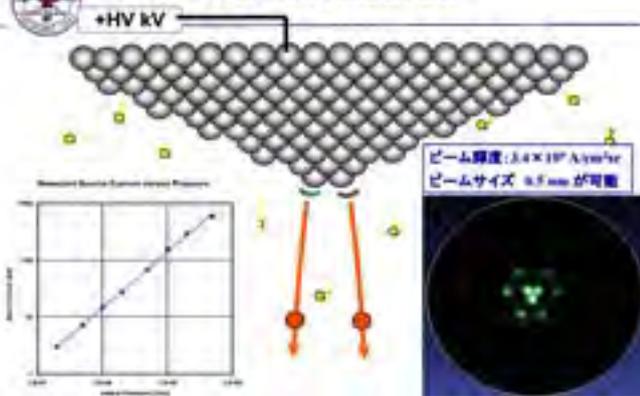


3次元分析:ナノビーム

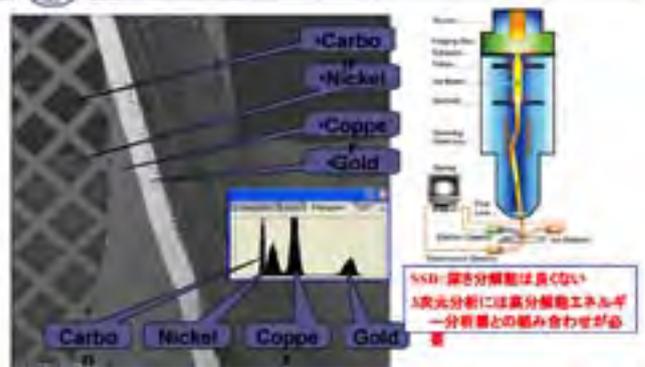
- ・ マイクロビーム化は可能
 - ◆ Conventional micro beam: MeV サブミクロン 50 pA
 - ◆ Liquid metal ion source: 数十 nm 50 pA
 - ◆ ALIS (atomic level ion source): 3.4×10^9 A/cm²sr
液体金属イオン源より1000倍明るい
ビームサイズ 0.5 nm が可能



ALIS ion source



RBS分析: ナノビーム+SSD

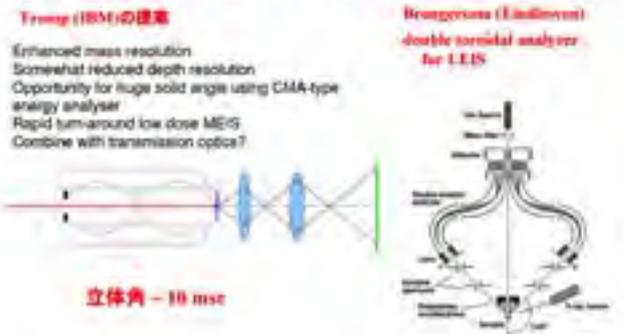


3次元分析の問題点

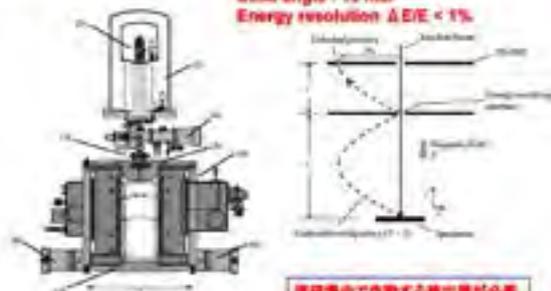
- ・ ダメージの問題
threshold dose: 5×10^{17} ions/cm² for Si
10 nm 1 pA → 5×10^{18} ions/cm²sec
イオンの照射量0.1 pC で分析する必要
100 keV He on Au
 $d\sigma/d\Omega = 4 \times 10^{-19}$ cm²/sr at $\theta = 30^\circ$
1 nm (6×10^{15} atoms/cm²), 0.1 pC
→ Yield = 1200 counts/sr
- ・ 広立体角(πsr)のエネルギー分析器が必要



広立体角エネルギー分析器: 有機物の分析



Cyclotron RBS (Kobelco)



Max. field in magnet 2 T
Solid angle >10 msr
Energy resolution $\Delta E/E < 1\%$

運轉途中で作動する検出器が必要

Prof. Boerma: Univ. Autonoma de Madrid



Solid angle $\pm 0.5^\circ \times 3^\circ$
Maximum rigidity 8 MeV nr, 2 MeV nr', 4.50 MeV 30"
Energy resolution $\Delta E/E = 10^{-4}$
Energy range 9%

1.0 弾を透過するため高エネルギーイオンで
は分解能低下する

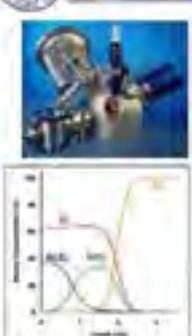
3次元分析:アナライザー

ダメージを避けるには $\sim sr$ の立体角が必要
静電型や磁場型のアナライザーでは10msr程度が限界?
→ TOF
SSDのエネルギー分解能向上
超伝導検出器?
大面積化が課題

高分解能RBS:長所と欠点

- 非破壊分析
- 定量性の良さ
- 深さ分解能 表面で $\sim 0.2 \text{ nm}$
ただし、深くなると劣化
- 比較的短時間の測定 (~ 10 分)
- 試料の前処理不要
- 横方向の分解能が悪い (3次元分析の要求)
- 軽元素の感度は悪い → ERDA
- 深くなると分解能劣化 → scattering
- 化学状態の分析は不可能
- 多重散乱の影響 → improvement of simulation

AR-XPS + Maximum Entropy Method



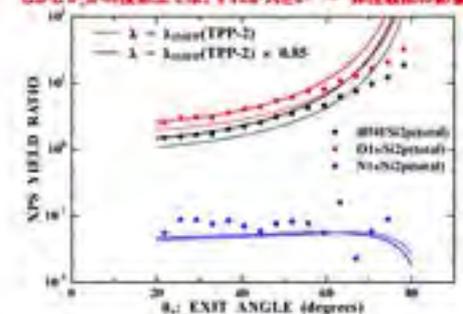
AR-XPSで化学状態も含めた深さ方向分析が可能?

AR-XPSの問題点
本質的な問題: 逆ラプラス変換に伴う困難
→ あらかじめ適当な知見があれば回避できる
HRBSの測定結果が利用できる
光電子の減衰長: 弾性散乱の効果無視できない
→ HRBSとの比較から弾性散乱の効果
正確に評価できる

AR-XPSとHRBSの複合分析法

AR-XPS: 減衰距離 \neq IMFP HRBSとの比較で明瞭に

λ をTPP-2の85%にすれば出射角が大きいときには測定結果を良く再現
しかし、 θ_e が40度以上では、ずれが大きい → 弾性散乱の影響



Y-axis: NPS YIELD RATIO (log scale)
X-axis: θ_e : EXIT ANGLE (degrees)

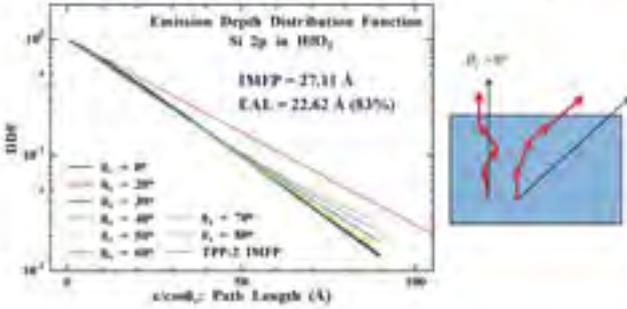
Legend:
 $\lambda = \lambda_{\text{IMFP}}(\text{TPP-2})$
 $\lambda = \lambda_{\text{IMFP}}(\text{TPP-2}) \times 0.85$

Data points:
 • Al(1s) (total)
 • O(1s) (total)
 • N(1s) (total)



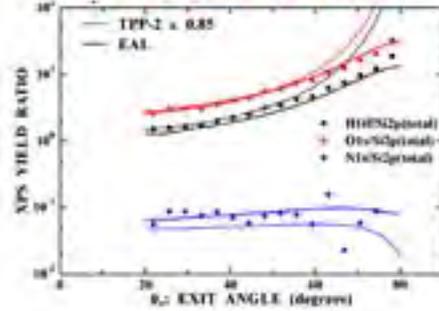
光電子の弾性散乱の効果

光電子の弾性散乱を考慮するとeffective attenuation length (EAL) は強いとIMFPより短くが、強い θ_e が大きいときには逆に長くなる

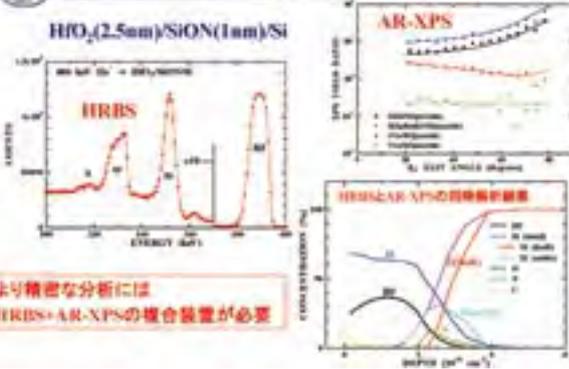


弾性散乱を考慮した有効減衰距離の使用が必要

広い角度範囲で測定結果を良く再現する。
→ AR-XPSの解析がより正確に可能となる



HRBSとAR-XPSの同時解析



より精密な分析には
HRBS+AR-XPSの複合装置が必要



まとめ

- ナノレベル3次元分析:
- ◆イオン照射によるダメージが問題
 - ◆広立体角アナライザーの開発
 - ◆超電導検出器の大量積化
- 複合分析:
- ◆AR-XPSとの複合分析
 - ◆化学状態も含めたサブnm分解能
 - ◆SIMS(sputtering)との併用
 - ◆深い領域も高分解能で測定可能に


 国際共同ワークショップ
 科学技術シーズ創出に向けた先端計測
 2006.11.22(金) 東京科学技術戦略センター

3次元アトムプローブ現状と展望

物質・材料研究機構 磁性材料研究センター
 WPIセンターナノアーキトロニクス国際研究拠点
 筑波大学大学院数理物質科学研究科 物質・材料工学専攻

宝野和博

<http://www.nims.go.jp/apfm/>

ナノ組織解析によるナノ組織材料創成

金属材料のナノ組織解析から得られる知見をもとに新たなナノ材料開発を目指す

プロセス

- 溶体急冷法
- スパッタリング
- 接着剤加工法
- メカニカルミリング
- プラズマ焼結法
- 相変態応用

プロセス設計



←

組織と特性

→

特性

- 磁気特性
- 力学特性

新しい組織材料の創成

ナノ構造の制御と材料

金属材料

金属ナノ粒子

金属ナノ線

金属ナノ膜

金属ナノ管

ナノ構造の制御と材料

金属材料

金属ナノ粒子

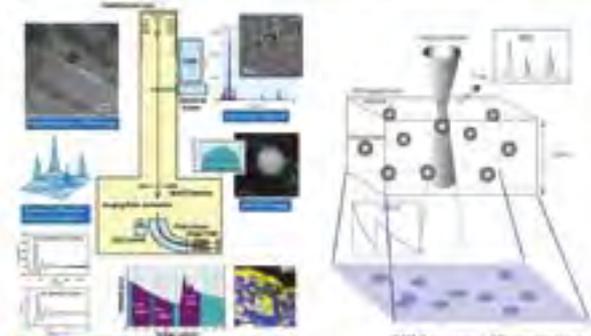
金属ナノ線

金属ナノ膜

金属ナノ管

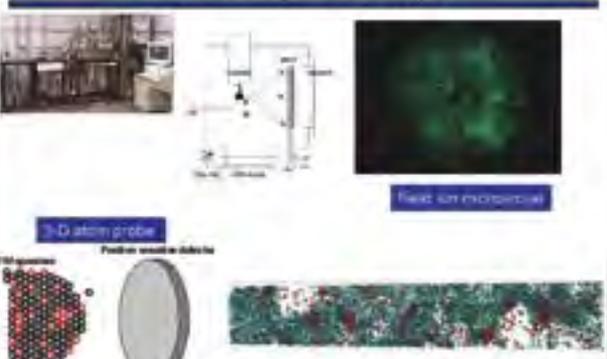
3DAP

Chemical analysis by TEM



TEM image - 2D projection

3-D Atom Probe



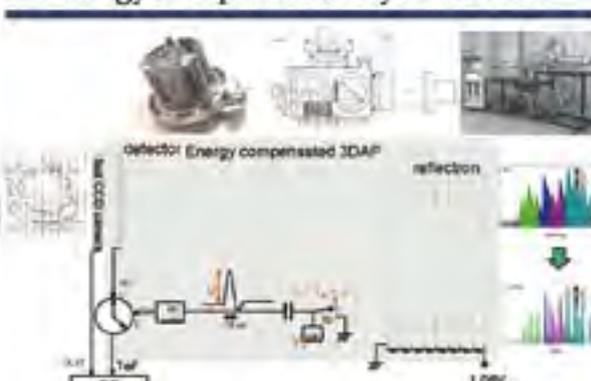
Field ion microscopy

3-D atom probe

Position sensitive detector

Fe₁₀Fe₇B₁₀C₁₀

Energy compensation by reflectron

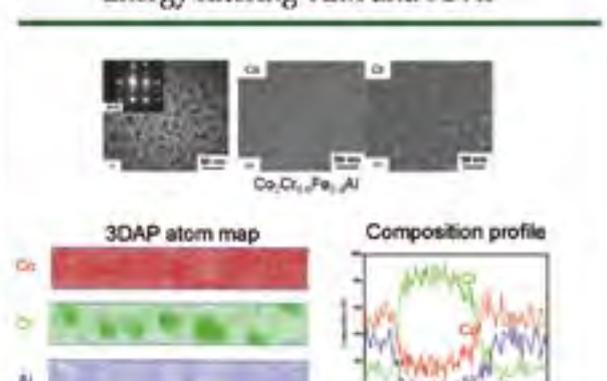


detector Energy compensated 3DAP

reflectron

1.00V_e

Energy filtering TEM and 3DAP



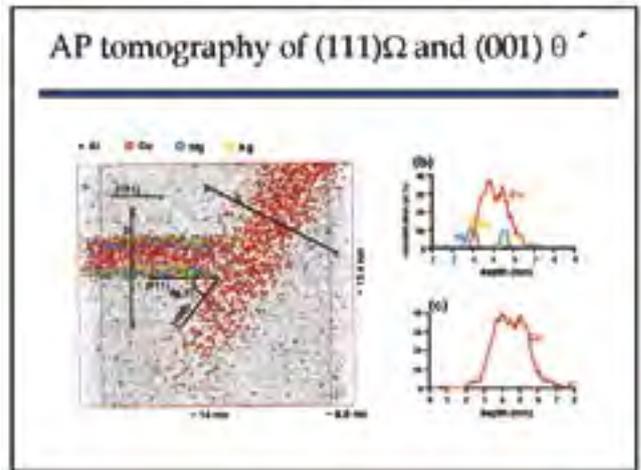
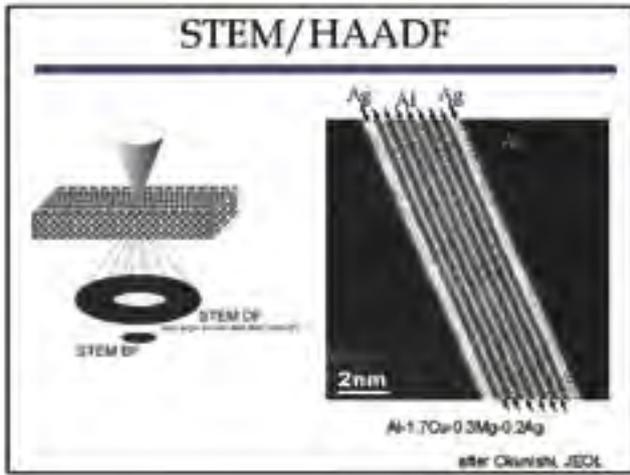
Co, Cr, Fe, Al

Co₂Cr₁₀Fe₁₀Al

3DAP atom map

Composition profile

20 nm



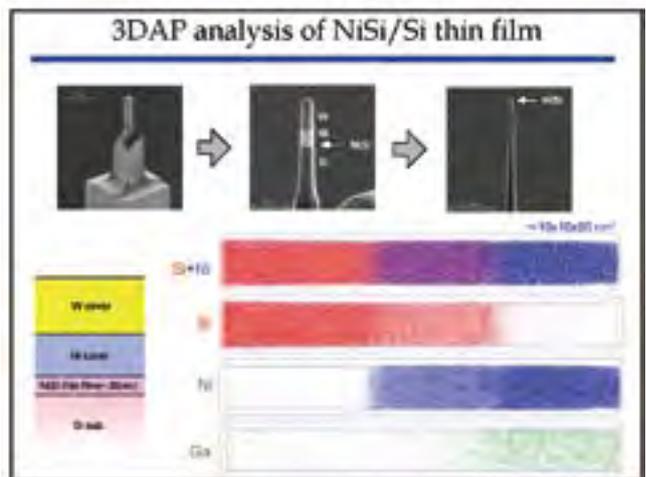
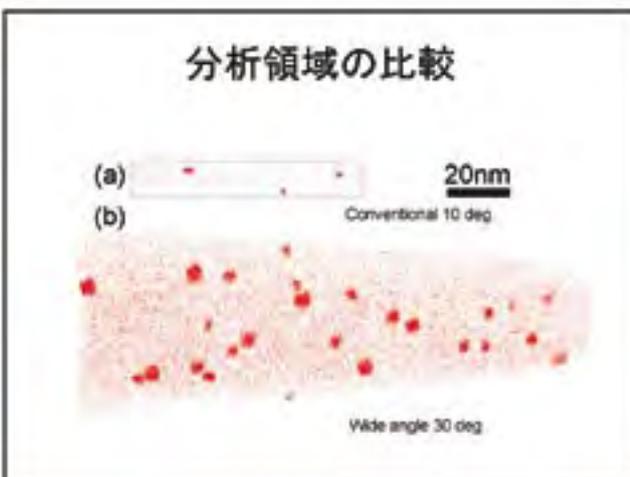
3DAPの原理的制約

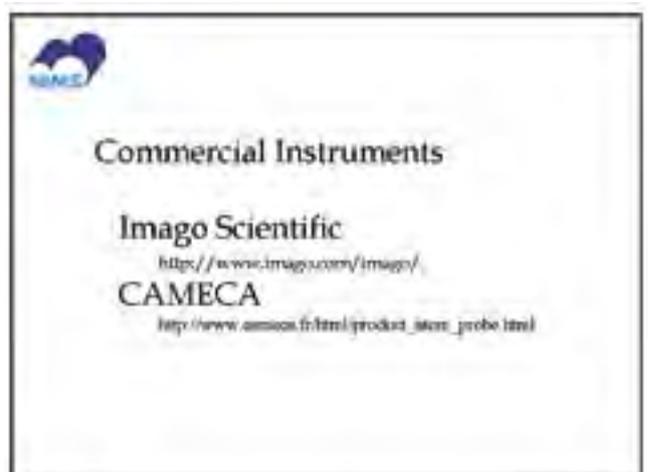
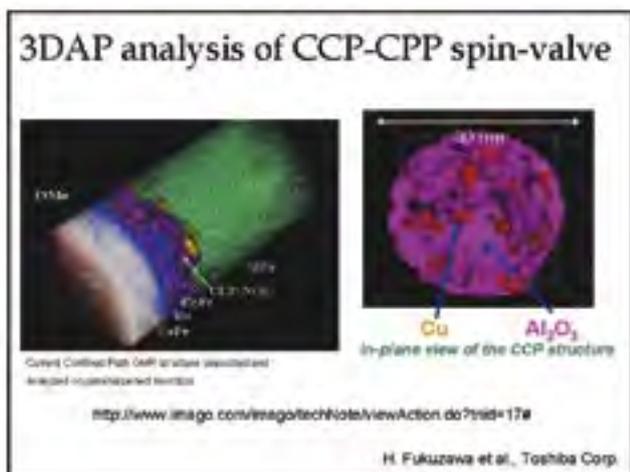
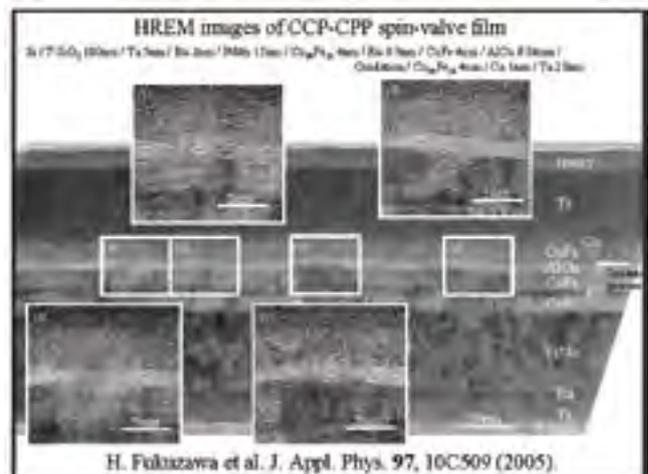
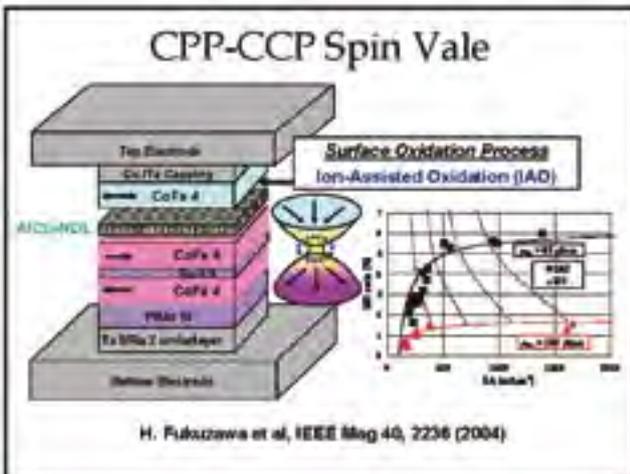
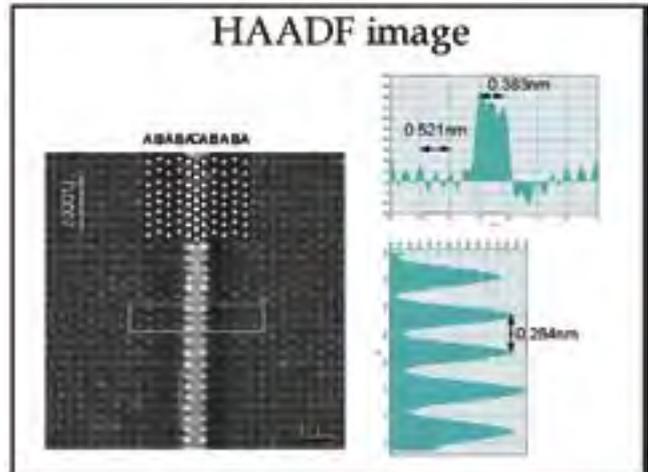
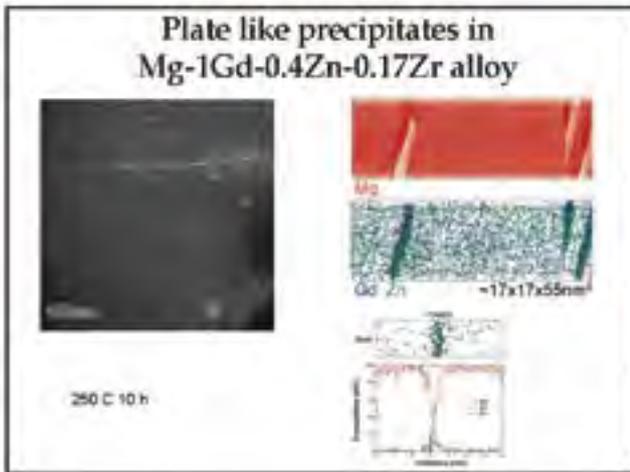
- 試料に導電性が必要 \Rightarrow 半導体・セラミクス分析不可
従来の解析例の殆どが金属材料
- 半導体・セラミクス分析ができると応用が広がる
- 分析領域が狭い \Rightarrow デバイス解析に不適
 $10 \times 10 \times 200 \text{ nm}^3$
- 針状試料が必要 \Rightarrow 任意領域からの分析困難
FIBによる広範な材料の任意領域からの試料作成
- 電界応力のため試料が破壊 \Rightarrow 難分析試料
 $\sigma = F/4\pi > \sigma_c$
分析の成功確率 1% - 20%
多くの試料を作製し何度も繰り返し試みる

高られた用途にしか使えない特殊な解析法

任意領域からFIBにより試料を作製し、80%以上の確率でデータを取得

Laser assisted wide angle 3DAP







まとめ

- 単一原子を3次元実空間でマッピングできる
- レーザ補助3DAPにより
分析成功率を著しく向上できる
広領域分析が可能
半導体分析が可能
絶縁体分析の可能性がある
- FIBによる試料作製法の開発により材料の粒界、異相界面、
表層、粉末、デバイスの任意箇所の分析が可能となった
- レーザ補助広角3DAPとFIBによる試料作製法の開発により
デバイス解析が可能となりつつある
- 金属材料産業からIT産業でも応用できる手法として発展

フォトサーマル分光法 (過渡反射格子法)

澤田 嗣郎(科学技術振興機構)

原理

物質(始状態) → 光(レーザー)で励起 → 物質(励起状態) → 無輻射緩和と過程(熱の発生)

測定項目:
- 音速、弾性波、屈折率、反射率などを測定
- 物質の定性・定量分析
- 物性評価

特徴

- 蛍光測定では見逃す無輻射過程
- 高汎用性
--- あらゆる状態(固体・液体・気体、それらの界面など)に対象品を換えずに適用可能
- 高感度
--- 蛍光測定に比べて1000倍高感度を実現
- 時間分解・空間分解測定
--- 極めて広いダイナミックレンジが可能

過渡分光法

通常の分光法 → 過渡分光法

パルス光 → 吸収 → 励起電子等 → 熱波音波 → 発光 散乱 (蛍光 レーザー散乱 偏光 ラマン散乱)

時間スケール:

- ms (ミリ秒: 10^{-3}): 周囲への伝熱、物質拡散
- μ s (マイクロ秒: 10^{-6}): 音波の伝播、化学反応
- ns (ナノ秒: 10^{-9}): 熱の発生、化学反応
- ps (ピコ秒: 10^{-12}): 分子の運動
- fs (フェムト秒: 10^{-15}): 電子の応答

パルス光照射後の試料の応答を高速に測定する。

過渡格子(TG)法

励起光 検出光 → 試料 → 回折光

- 励起状態のダイナミクス
 - + S1, S2, T1状態などの寿命
 - + ラジカルなど活性種の寿命
- 光熱変換ダイナミクス
 - + 温度の増加、熱拡散
 - + 弾性波の発生、伝播

バックグラウンドフリーで高感度

さざなみ顕微鏡の開発

A.P.L.(1991)
TRG法による表面スキャンニング

スキャン → プロブ光 → 励起光 → 回折光検出 → 欠陥、不純物など (数10 μ m)

TRG信号を高倍化 → 数10 μ m

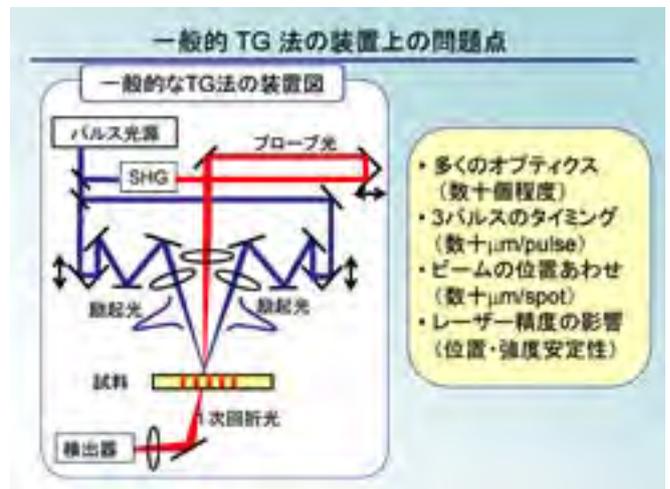
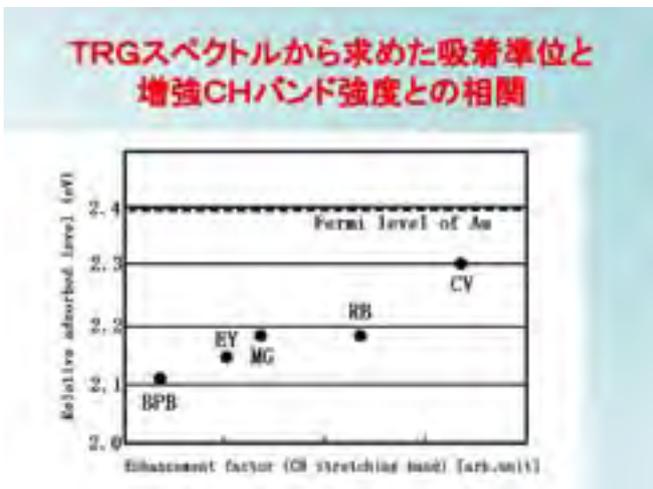
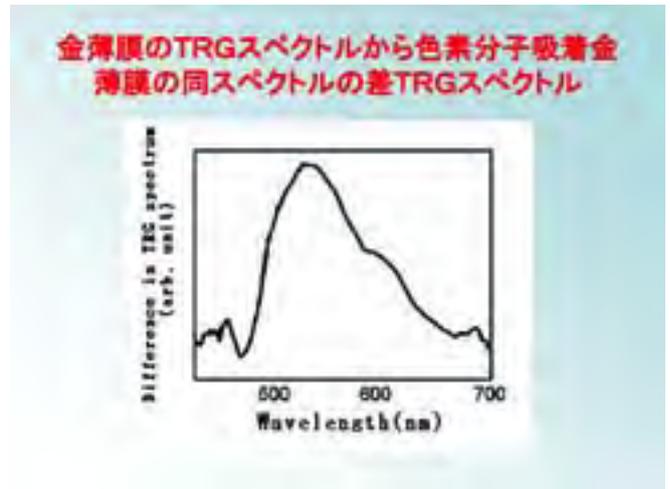
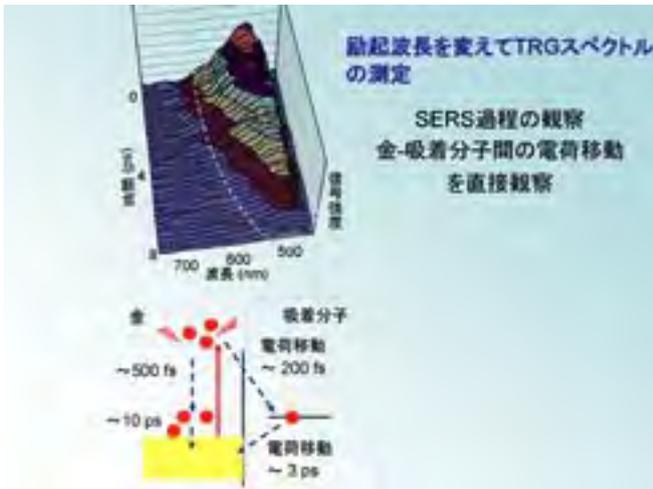
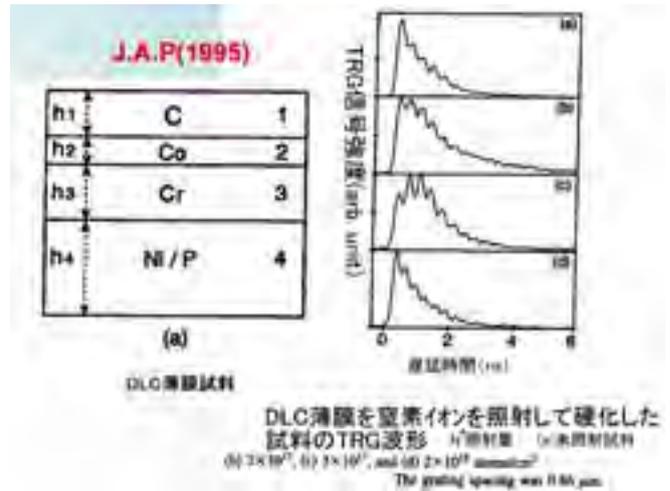
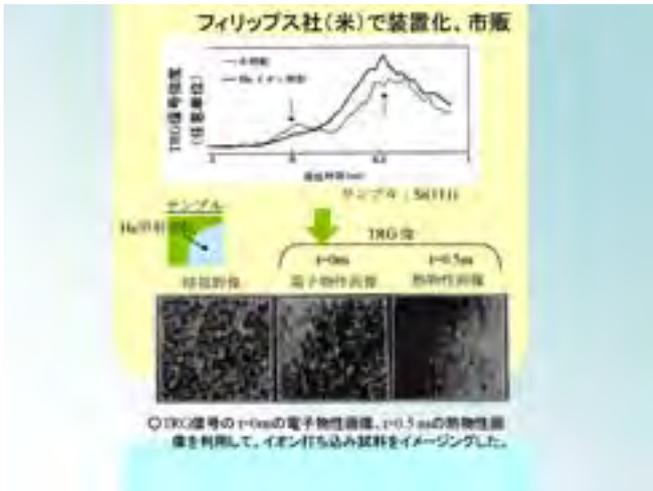
電子物性画像、熱伝導率画像、表面弾性率画像を選択的に観測可能。

試料: SiO₂(2nm)/Si(111)
(p-type, resistivity 40 Ω cm)
回折格子: 2.75 μ m λ (110)

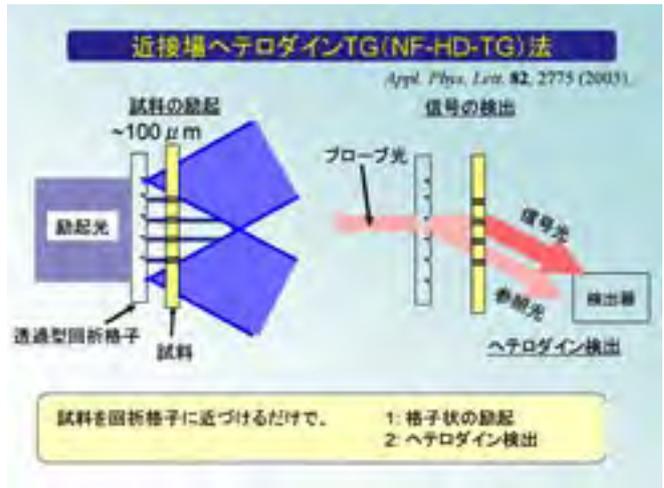
典型的なTRG波形

遅延時間(ns)

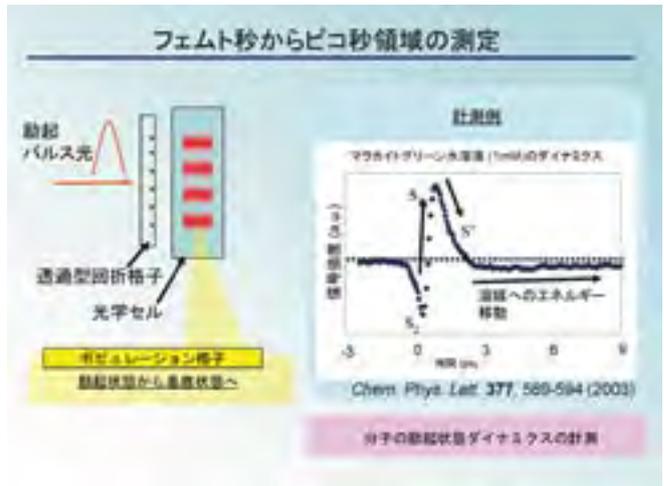
a) キャリア密度
b) 表面弾性波(音波)
c) 熱拡散



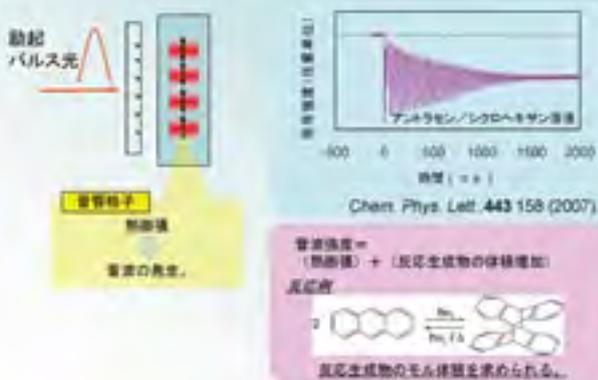
過渡格子法から
超簡易型過渡格子法の開発



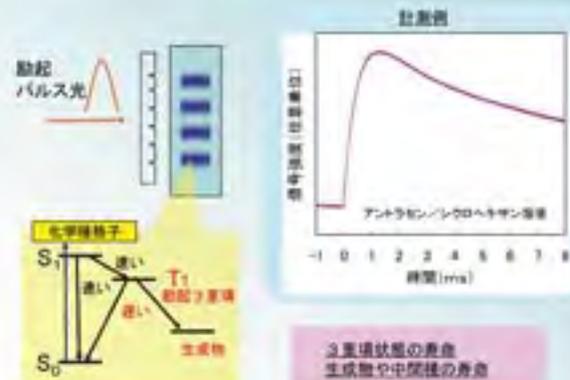
特徴1:
 広いダイナミックレンジの測定
 さまざまな情報の抽出



ピコ秒からナノ秒領域の測定



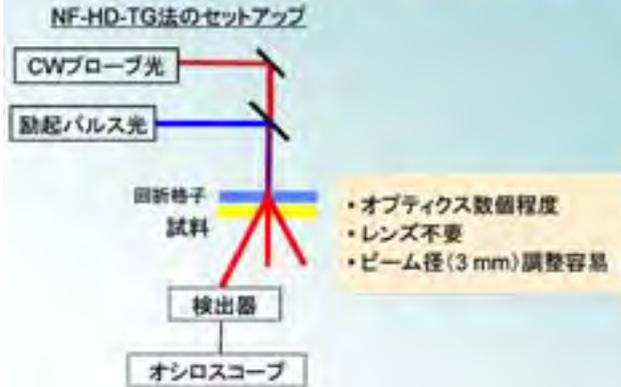
マイクロ秒からミリ秒領域の測定



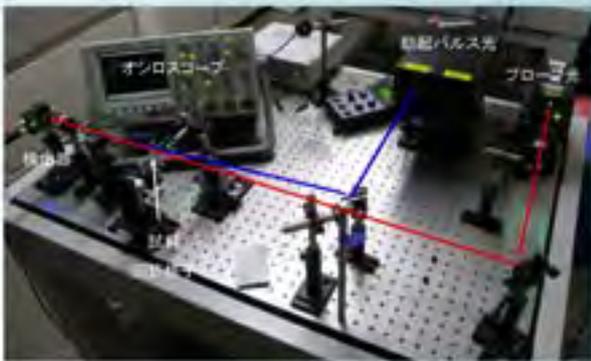
特徴2:
非常に簡単な光学系

片山建二(中央大理工 準教授)から借用

NF-HD-TG法の特徴1 簡易光学系



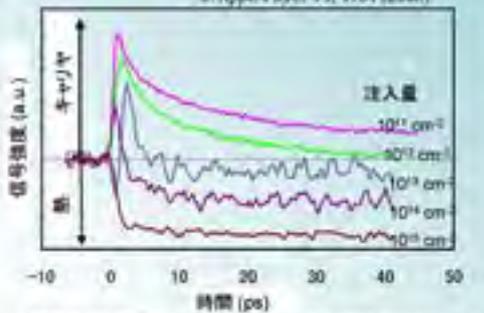
NF-HD-TG装置写真



さまざまなアプリケーション例

LF-HD-TG 法の応用②
- イオン注入シリコンの欠陥解析 -

J. Appl. Phys., 94, 4904 (2003)



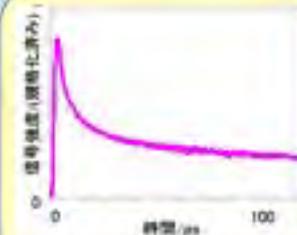
従来は注入量計測限界(10^{12} cm^{-2})以下まで測定可能。

粒子状試料への適用例① 太陽電池材料

東通大豊田研との共同研究

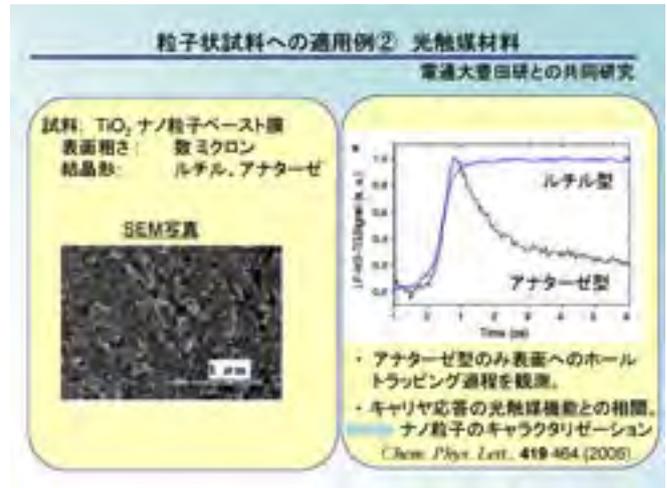
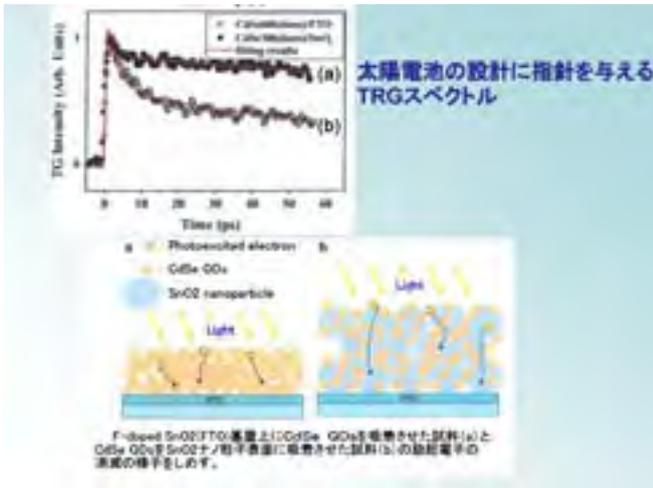
試料: TiO_2 上のCdSe ナノ粒子
CdSeサイズ: 5-7 nm
2次粒子凝集体サイズ: $1 \mu\text{m}$
表面積: 数ミクロン

SEM写真



ナノ粒子から酸化チタンへの励起キャリアの注入。

Thin Solid Films, 496 15-19 (2005)



NF-HD-TG法による測定例一覧

測定試料	試料形態	主な測定結果
金属膜	固体	10nm程度まで測定可能。
色素溶液	液体	ポピュレーションダイナミクス。
半導体ウエハー	不透明固体	キャリア寿命計測。
アントラセン	液体	光化学反応ダイナミクス。
ポーラスシリコン	固体(表面凹凸大)	発光過程にかかわるプロセスを解明。
イオン注入シリコン	不透明固体	従来法の1/10以下の注入量を計測可。
CdSe量子ドット	粒子状固体	量子単位からの電荷注入過程。 (太陽電池材料)
TiO_2 ナノ粒子	粒子状固体	結晶形によるキャリアプロセスの違い。 (光触媒との関連)
金ナノ粒子	不均一液体	核生成ダイナミクス。

CPL 442 89 (2007), 443 158 (2007), 427 192 (2006), 419 464 (2005), 377 589 (2003), APL 90 171117 (2007), 82 2775 (2003), JAP 94 4904 (2003) など。

終わりに..

本法は、物質による光吸収を起源とする、光を散乱、屈折させることのできるあらゆる現象を一本のプロブビームで広い時間幅 (fs から ns, s以上) に亘ってリアルタイムで追跡できる過渡分光法であるといえる。非常に汎用性が高い、分光装置や種々の材料物性診断装置になると期待される。

X線分光(X線装置技術)

河合 潤

(京都大学大学院工学研究科材料工学専攻)

- シンクロトロン放射(科学的に最高水準、各国構並び)
- X線管
- 医学診断(透過像、CT像、位相像、コンプトン像、ホログラフィー)

X線管を用いた装置—3極化

- 大型専用装置(製造プロセスラインに特化した装置、高精度・高安定性・迅速：例SUS304の検査・半導体汚染検査)ー日本が独走
- 卓上型汎用装置：世界で横並び・定量精度は日本(コンプトン散乱補正)、3次元光学系欧州
- ハンディー(米国ナイトン社、イノベックス社、フィンランド、英国、中国スカイレイ社)
- 全反射蛍光X線：日本発、シェア、ISO規格の主導種

- ▲ 小型X線管：浜ホト、X線技術研究所、カーボンナノチューブ
- SDD、Si-PIN素子：欧米、中国、浜ホト

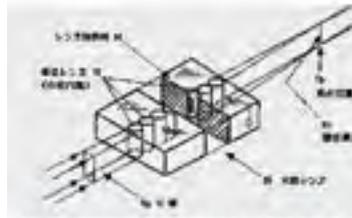


SUS317 Standard steel analyzed by Niton

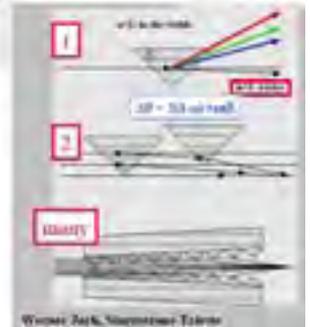
	10 seconds ± 2σ (%)	Certified %	Niton BCR680 Plastic standard material (non-PVC type)	
Mo	0.10±0.02	0.096	30 seconds ± 2σ (ppm)	Certified ppm
Nb	0.58±0.04	0.54	Cd	123±17 140.6
Mn	1.69±0.32	1.77	Pb	102±17 107.6
Ni	9.17±0.49	9.41	Be	834±10 808
Cr	18.20±0.44	17.47	Hg	23±10 25.3
Fe	69.86±0.73	69.61	Ce	197±92 115.8



X線要素部品



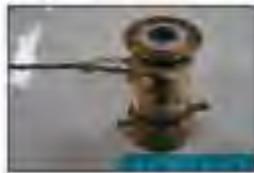
富江:特開平7-230000. X線レンズ



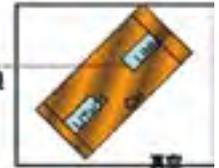
富島:特公平7-11600. X線真中装置



帯電によるX線の発生



検出器



真空

各200枚程度

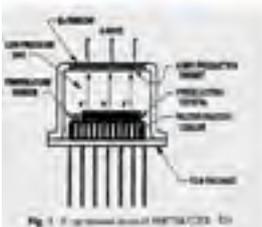


Fig. 1. Cross-sectional view of HAP70A (2000 - 01)

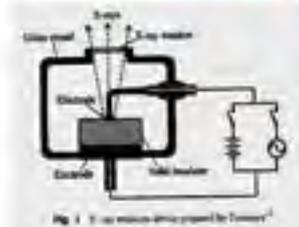
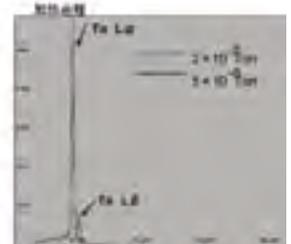
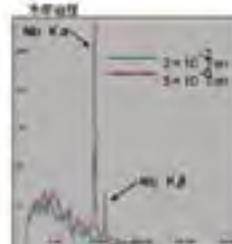


Fig. 2. Cross-sectional view of HAP70A (2000 - 01)

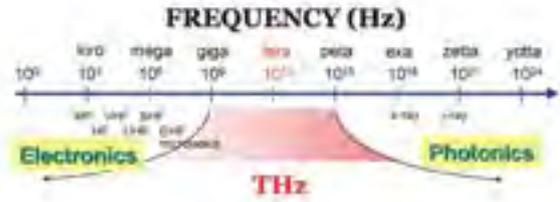


X線装置部品

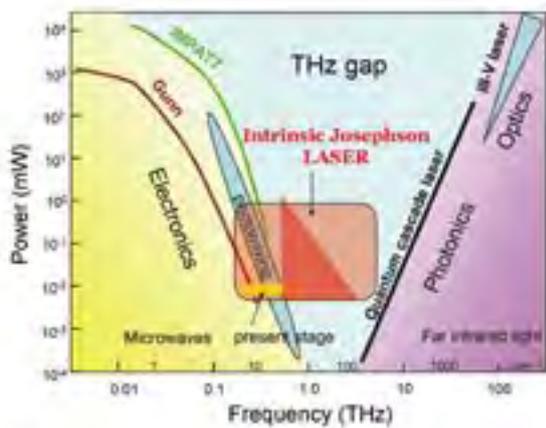
- X線検出器
- マイクロカロリメータ, ブレークスルーが必要
- Si-PIN: ポテンシャル有り, 市販していない
- SDD: 中国
- X線発生
- X線分光, 原理: X線ラマン, EXEFS
- シンクロトン放射光に迫るハンディー装置
- 核融合への発展
- X線レンズ: オリジナリティーは日本

Josephson PlasmaによるTHz波発振の理論と実験

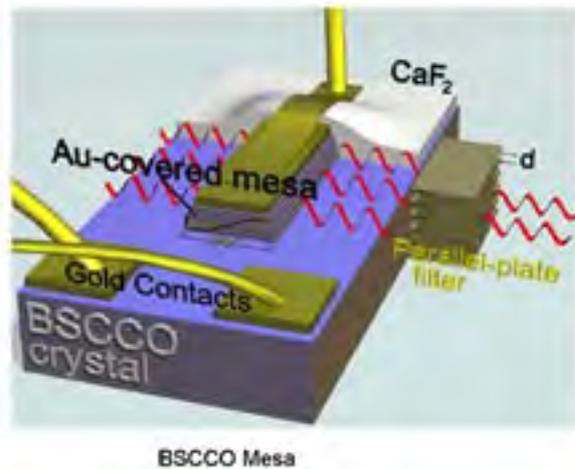
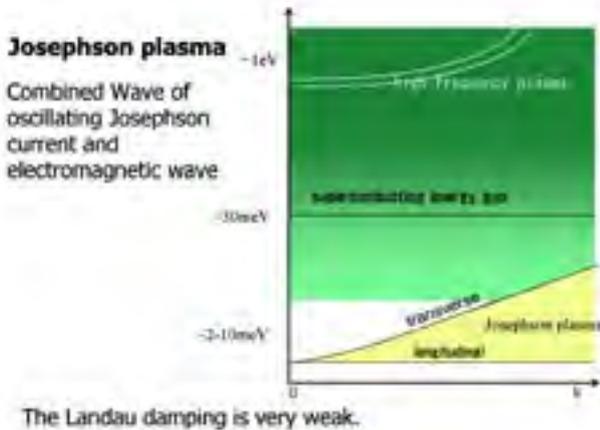
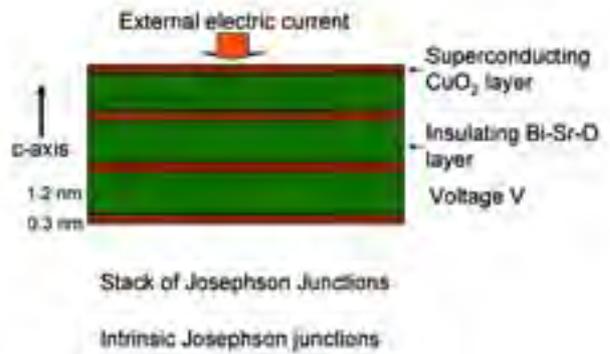
立木 高
 東京大学新領域創成科学科
 JST CREST



医学生物学、テロ対策、情報通信



$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ 高温超電導体



ac Josephson effect

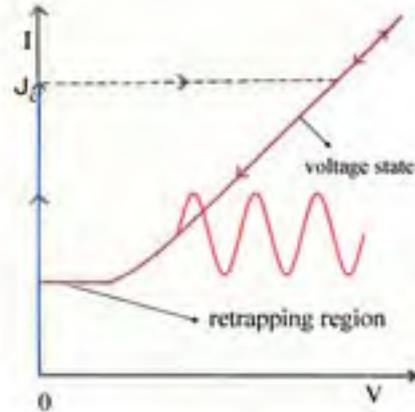
$$I = J_c \sin(2e/h)Vt, \quad V: \text{voltage}$$

Oscillating current with the angular frequency

$$\omega_J = (2e/h)V$$

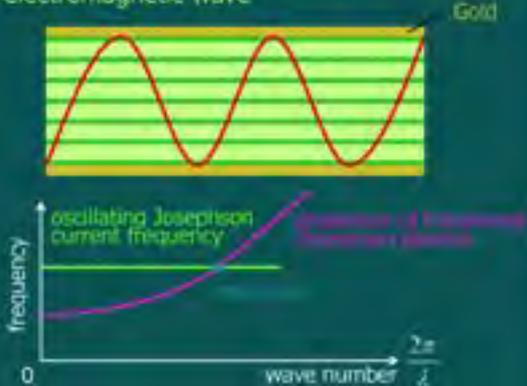
Frequency $\nu = \frac{\omega_J}{2\pi} = \frac{2e}{h}V$

1THz $\text{---} 2.068\text{mV}$



Josephson plasma

- Combined wave of oscillating Josephson current and electromagnetic wave



The excited transverse plasma wave is reflected at both the surfaces of mesa

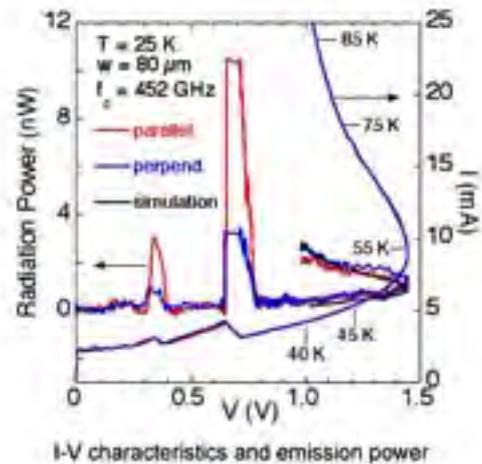
The mesa itself works as a cavity and the excited wave turns to a standing wave $\text{---} \text{Cavity resonance}$

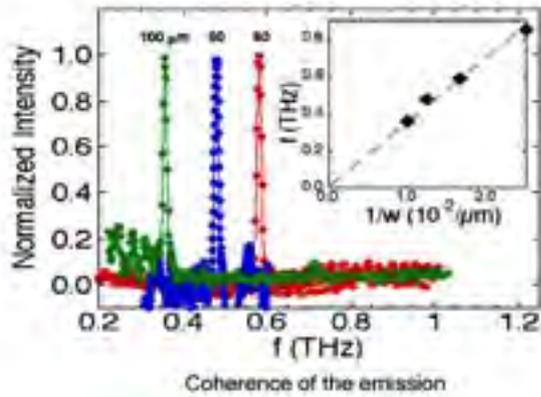
$$\frac{\lambda}{2}n = W, \quad n = \text{integers}$$

$$f \approx \frac{c/\sqrt{\epsilon}}{\lambda} = \frac{c/\sqrt{\epsilon}}{2} \frac{1}{W}, \quad \text{for } n=1$$

ac Josephson 電流

- 横 Josephson プラズマを励起
Cavity resonance mode
- Mesa 表面で THz 電磁波に変換





コヒーレント連続テラヘルツ波

発振する温度領域 20K — 50K

振動数 0.5THz — 3THz

発振強度 $\square 5 \mu\text{W}$

L. Ozyuzer et al., Science 318, 1291 (2007)

今後の目標点

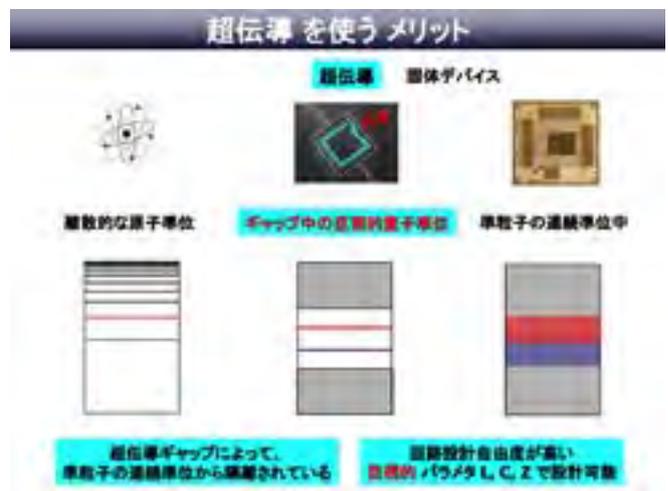
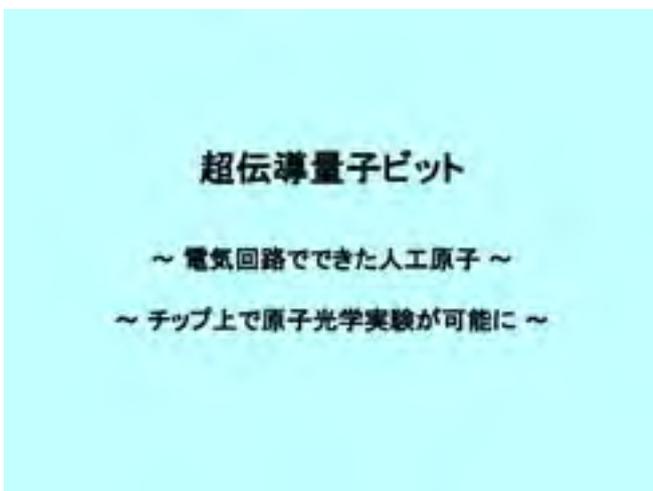
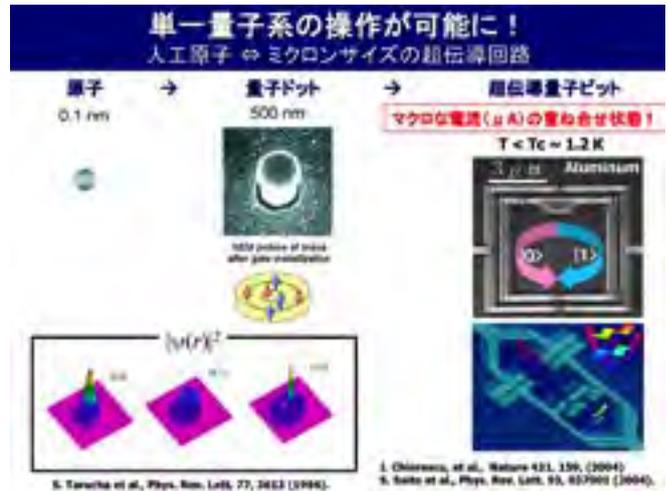
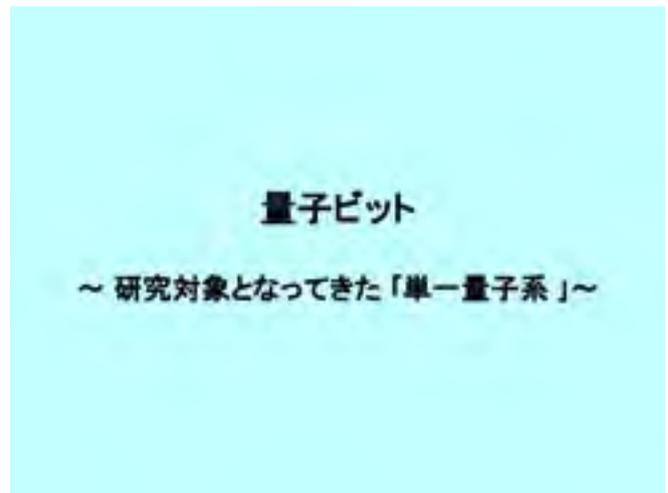
発振強度をもっと強くする

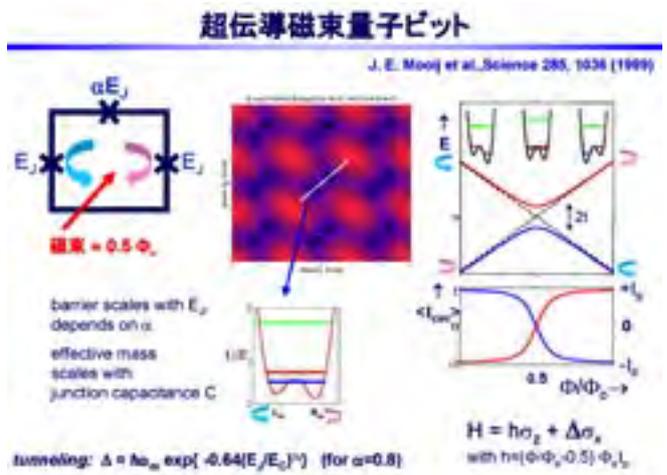
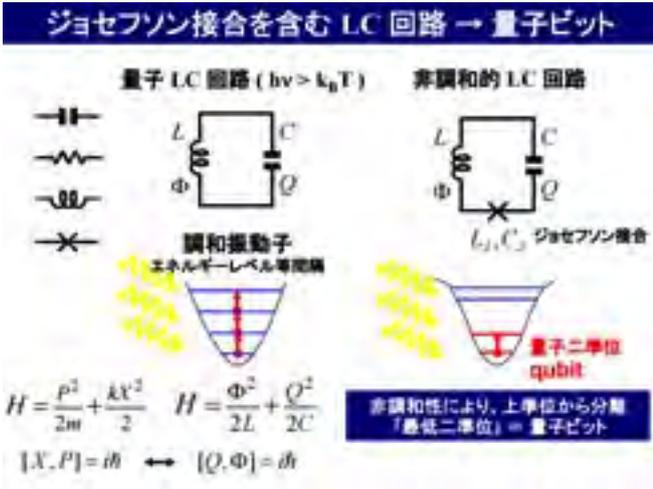
発振機構 \longrightarrow 発振素子の設計

発振周波数をtunableにする

磁場をかけると発振周波数はtunableになる

Intrinsic Josephson junction でテラヘルツ波を計測するcompactな装置を開発する





試料作製方法

二方向蒸着法(アルミニウム)

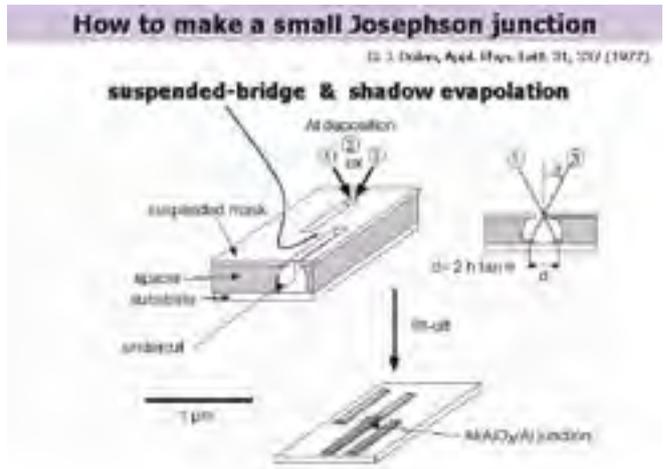
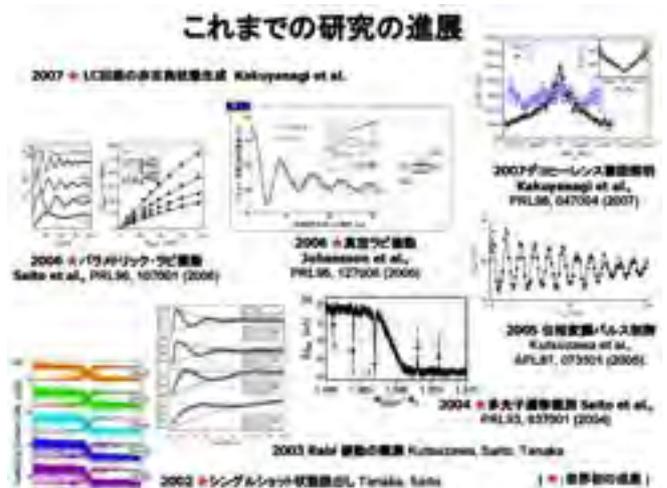
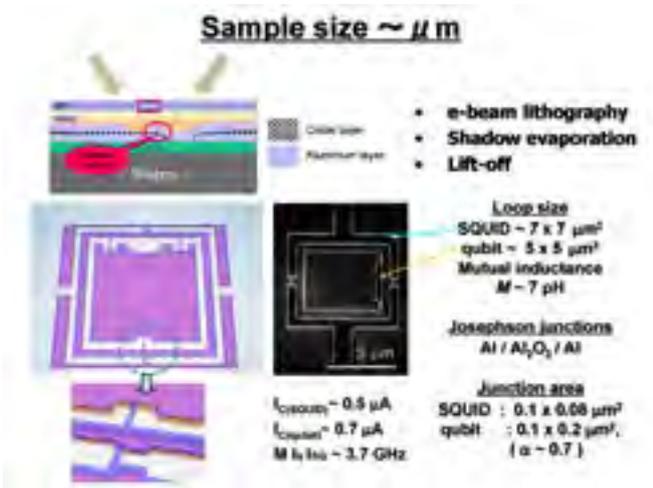
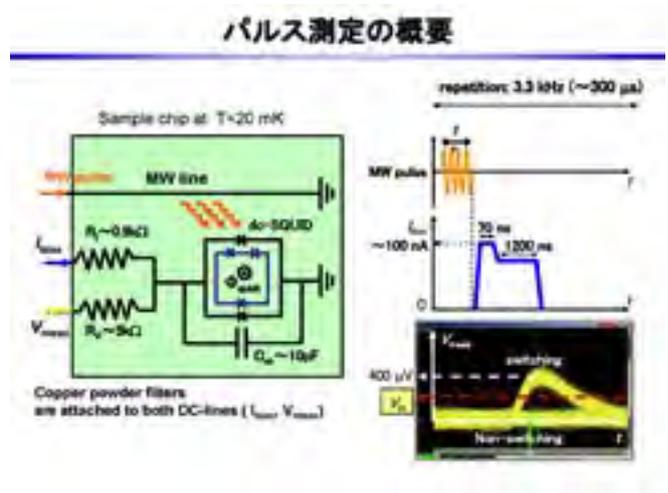
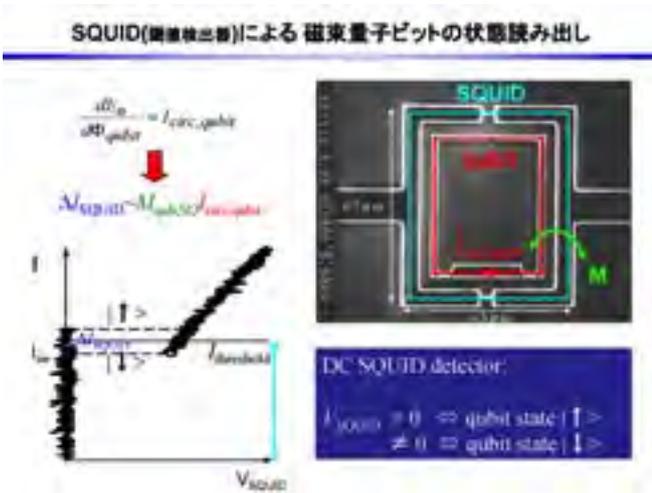
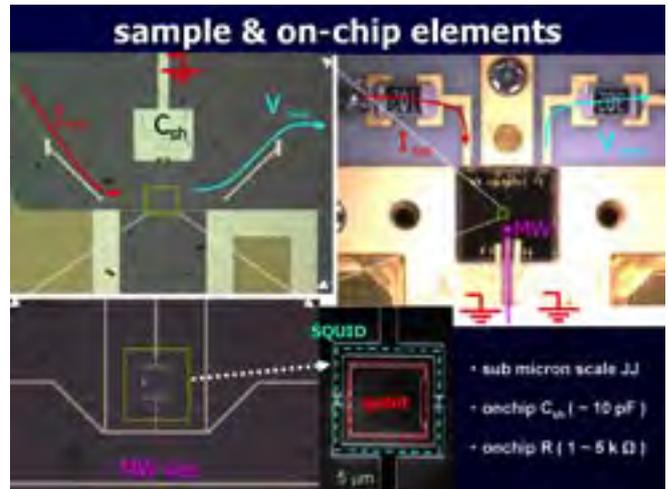
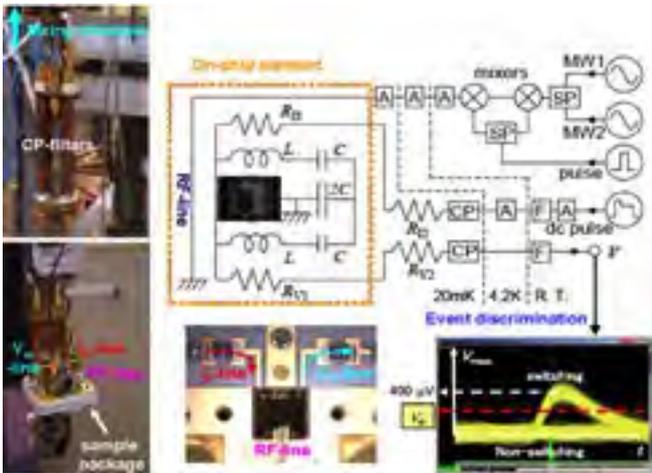
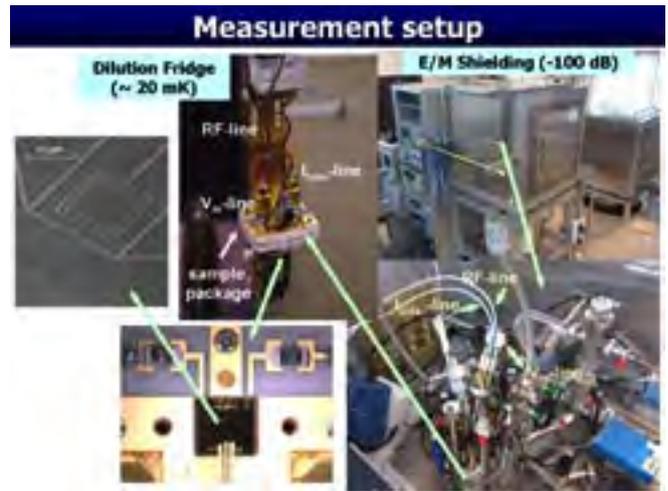


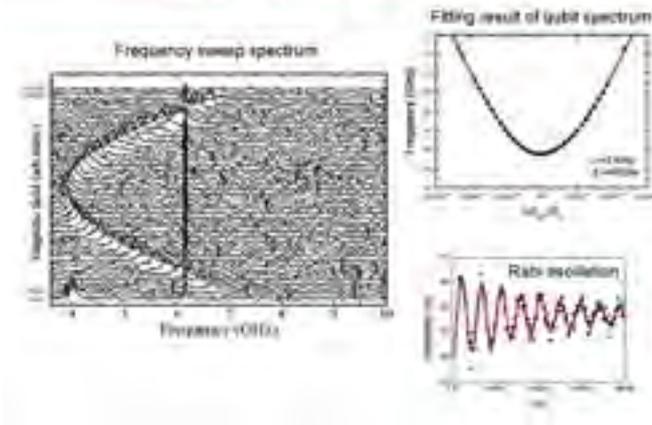
fig2.17 Thesis, Audrey Cottet
<http://www-dream.cea.fr/dream/spec/Pres/Quantro>



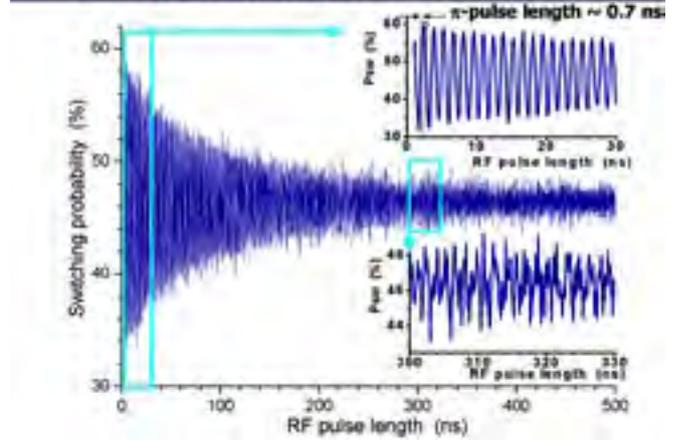
測定系・測定方法



スペクトロスコピー



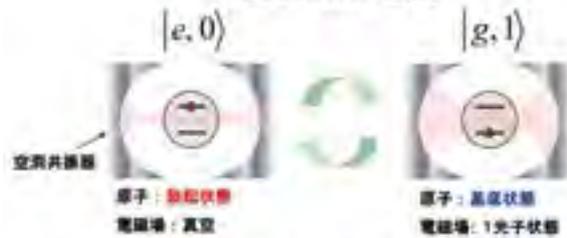
Rabi oscillations under strong drive



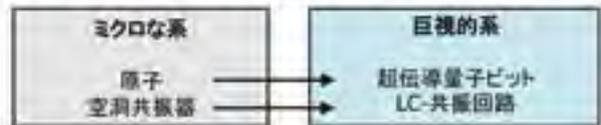
超伝導量子ビットと単一光子の量子もつれ

$$\alpha|g1\rangle + \beta|e0\rangle$$

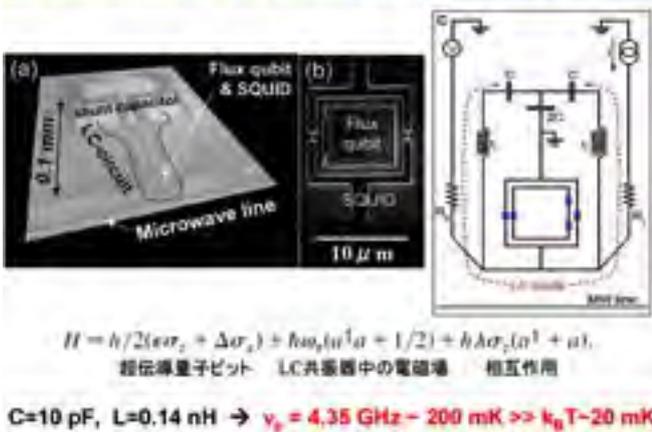
真空 Rabi 振動



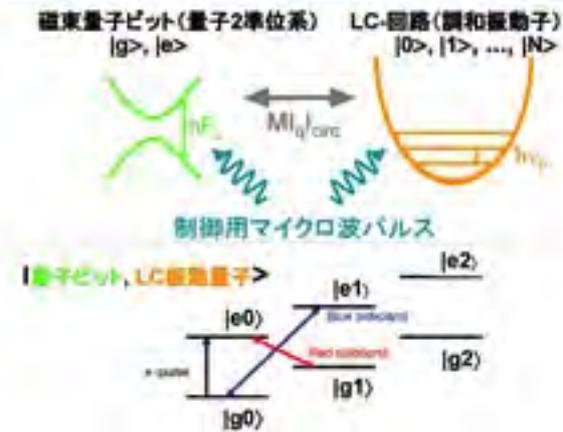
物質と光のエンタングルメントの最も基本的な過程

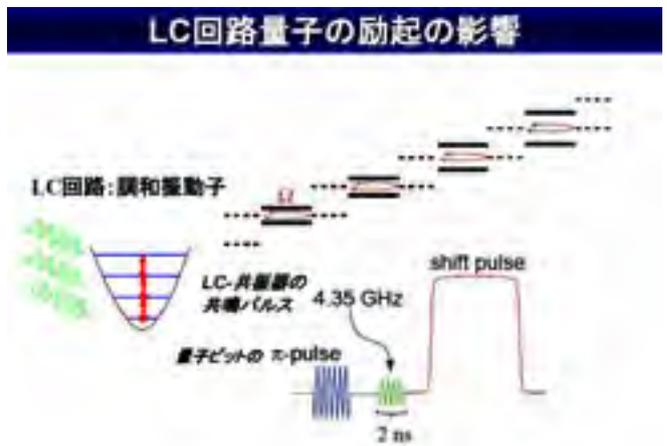
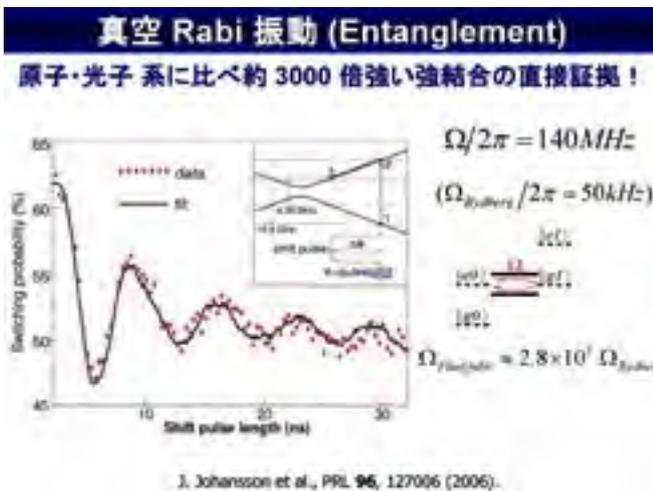
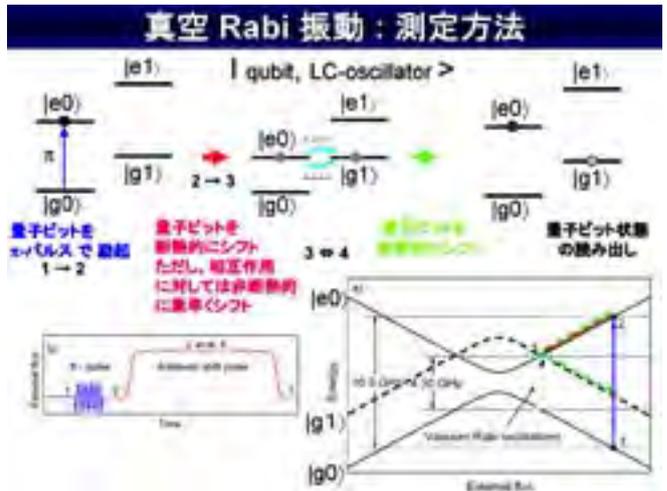
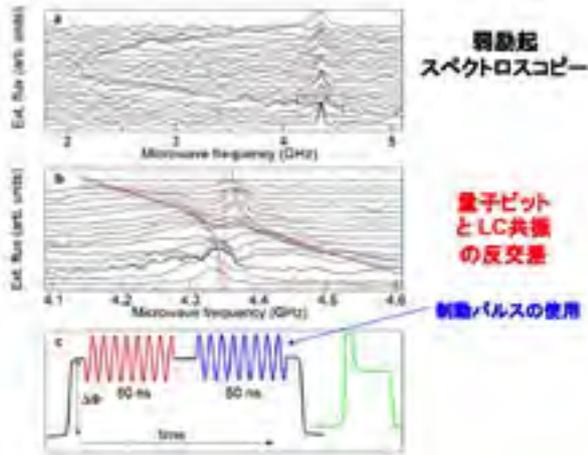
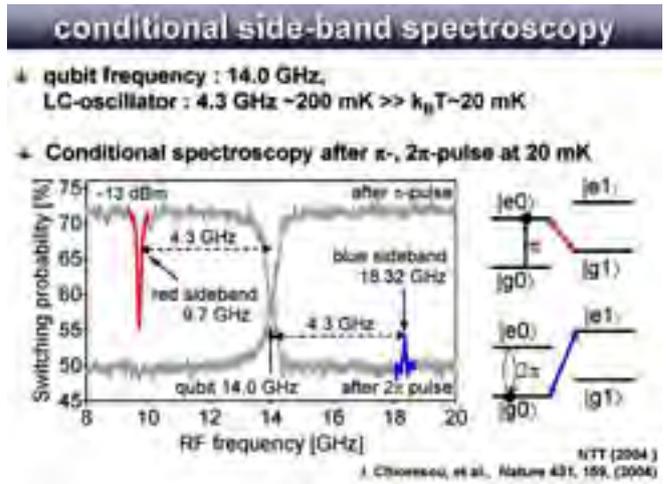
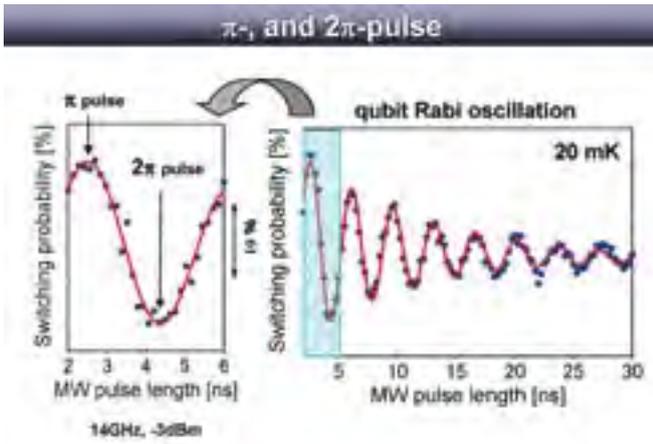


超伝導磁束量子ビット LC共振器 システム

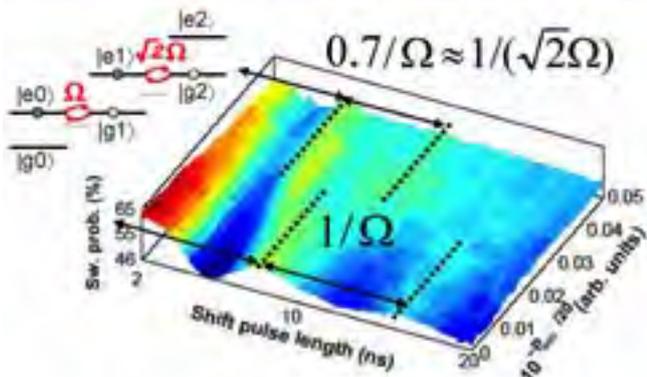


LC-回路の電流とエンタングルした磁束量子ビット





確認のための実験: 振動周期の量子化



Atom - cavity QED との関係・優位点

まとめ

人工単一量子系 超伝導磁束量子ビットの量子操作と
 (ns 幅のマイクロ波パルス、磁束バイアスDCパルス)
 量子状態の読み出しが可能となった
 (SQUID 経由 us 破壊測定 → QND by JBA/CBA)

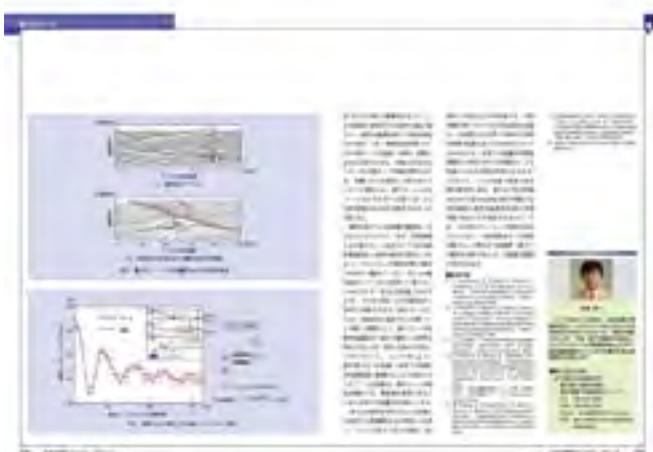
超伝導磁束量子ビットとマイクロ波共振器中の単一光子の
 量子もつれの精脚と観測が可能に
 原子系に比べて 3~4 桁強い相互作用を実証
 相互作用の in-situ control 単一原子メーザ 他



NTT技術ジャーナル誌 Vol.19 No.11, pp.18-23



NTT技術ジャーナル誌 Vol.19 No.11, pp.18-23



NTT技術ジャーナル誌 Vol.19 No.11, pp.18-23

**ホトニッククリスタル(PC)
の応用利用**

馬場俊彦
baba@ynu.ac.jp
横浜国立大学
<http://www.dnj.ynu.ac.jp/baba-lab/index-j.html>

Topics

- 

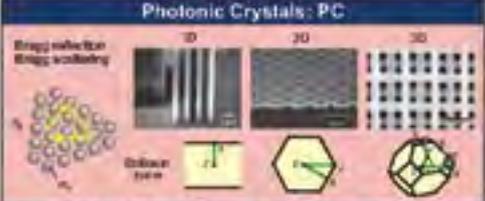
PC Nanolaser
RT CW lasing in ultrasmall nanocavity
Application to refractive index sensing
- 

PC Negative refractive optics
Lens and prism effects
Application to compact demultiplexer
- 

Silicon photonics device
Compact optical wiring by photonic wire waveg.
Devices and circuits are dramatically miniaturized
CMOS compatible design and process desired
to move away from old optical technology

Photonic Nanostructures

Photonic Crystals: PC



High Index Contrast Structure: HIC



Photonic Crystal Nanolasers

Photonic Crystal Slab



after Painter et al., Science 284, 1610 (1999)

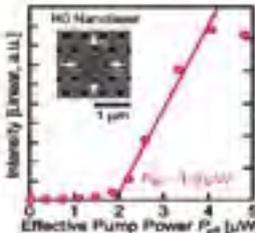
Light localization in nanocavity
by photonic bandgap (PBG)
and index confinement



Model volume ~0.4Q/n³

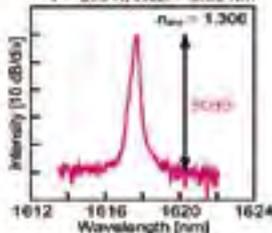
CW Lasing Characteristics

1D Nanolaser

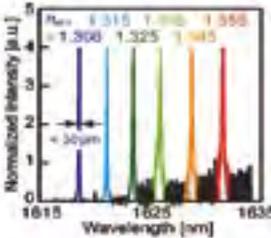


Ultralow threshold lasing with low background level

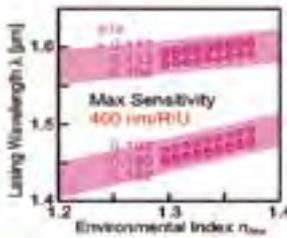
T = 293 K, Res. = 0.02 nm



Index Sensing Characteristics



Spectral FWHM = 30 pm (Resolution 1m), Sensitivity of 400 nm/RIU



Max Sensitivity
400 nm/RIU

Potential detection limit of ~ 10⁻⁴ RIU

Material Sensing Using Nanolaser Array

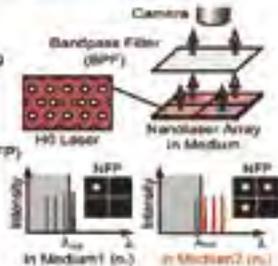
Refractive index sensor without a spectrometer

PC Nanolaser Array

Many nanolasers with different lasing wavelengths integrated on a chip

Sensing Method

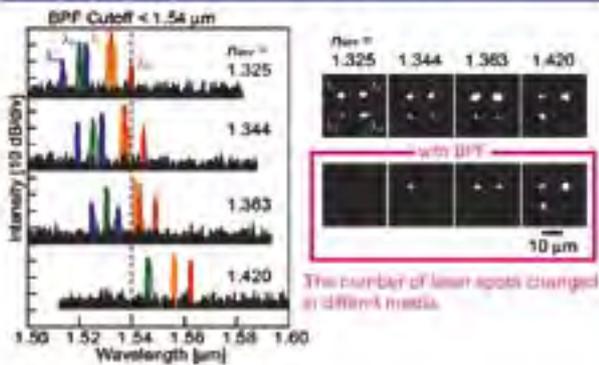
- Observation of near field pattern (NFP) through BPF
- When n_{ext} changes, each lasing wavelength shifts \rightarrow NFP changes



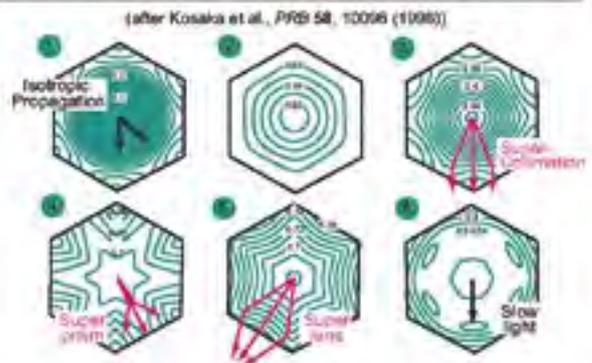
Array of 4 H0 Nanolasers ($\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3 > \lambda_4$)



Spectra and NFP in Various Media



Functions Predicted from Dispersion Surfaces



Topics



PC Nanolaser
RT CW lasing in ultrasml nanocavity
Application to refractive index sensing

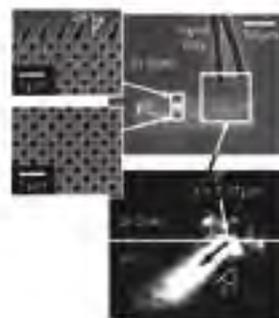


PC Negative refractive optics
Lens and prism effects
Application to compact demultiplexer

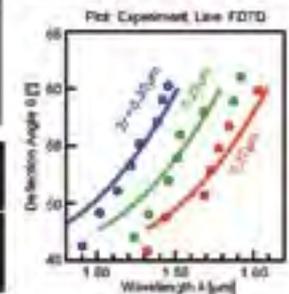


Silicon photonic device
Compact optical wiring by photonic wire waveg.
Devices and circuits are dramatically miniaturized
CMOS compatible design and process desired
to move away from old optical technology

Observation of Negative Refraction

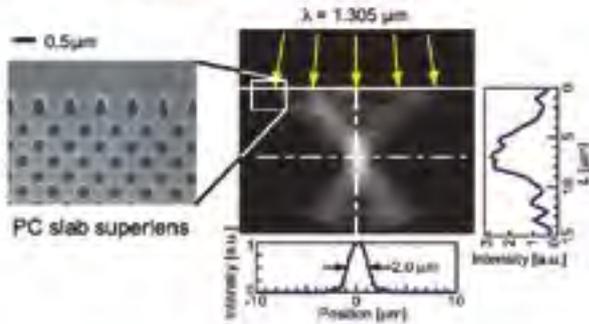


(Mariani et al., APL 91, 091117 (2007))



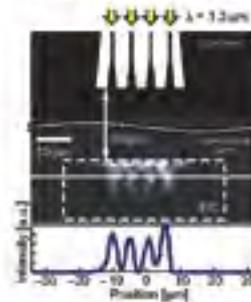
Light Focusing in PC Superlens

(Matsumoto, et al. *OL* 31, 2776 (2006))



Applications of Superlens

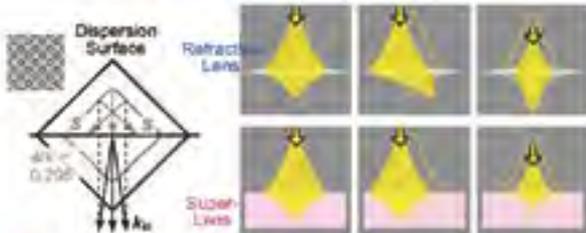
Parallel optical coupler
(Matsumoto et al. *OPL&D* 7 (2007))



Compact demultiplexer
(Matsumoto et al. *OP* 13, 10108 (2006))



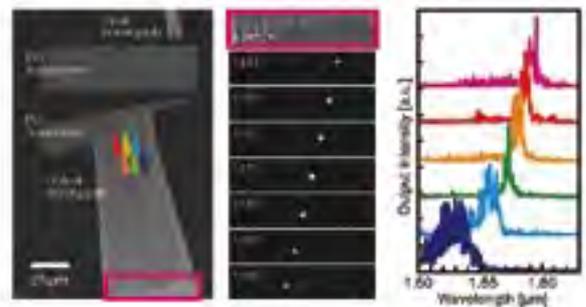
Unique Focusing of PC Superlens



- Real image formation by flat lens (virtual image by curved lens)
- Compact total system due to very short focal length
- Applications to compact parallel optical coupler, demultiplexer, image system, etc.

Superprism and Superlens Demultiplexer

(Matsumoto et al. *APL* 91, 091117 (2007))



Topics



PC Nanolaser

RT CW lasing in ultrasmall nanocavity
Application to refractive index sensing



PC Negative refractive optics

Lens and prism effects
Application to compact demultiplexer

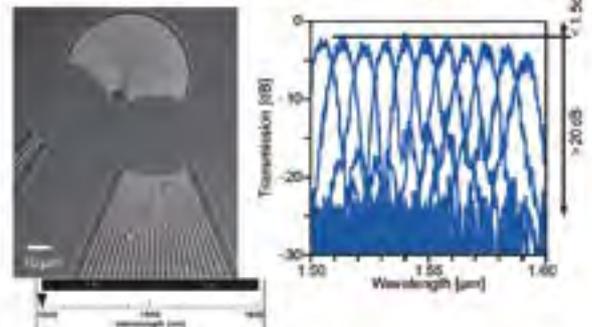


Silicon photonics device

Compact optical wiring by photonic wire waveguides
Devices and circuits are dramatically miniaturized
CMOS compatible design and process desired
to move away from old optical technology

Ultra-Compact Si Wire AWG Demultiplexer

(Fukuzawa et al. *JJAP* 43, L673 (2004); Ohno et al. *JJAP* 45, 6126 (2006))



Si Photonic Wire Waveguide

- HiC single mode waveguide
- Low loss (<0.3dB) μ -component available
- Various passive devices e.g. H-tree circuit, MZI, AWG, μ -ring demonstrated



(Sakai et al., JAP #46, L383 (2003))



(Sakai et al., EYCE Trans (Optics) #38-4, 502 (2003))



(Fukushima et al., JAP #41, L3487 (2002))

Impact of Silicon Photonics

- Material**
 - Excellent material characteristics except for light emission
 - High quality wafer available
- Process**
 - CMOS compatible process
 - Order to foundry
 - Remarkable cost reduction
- Integration**
 - High density O/E integration
 - Next generation PLC
 - Intra-chip optical interconnects



Topics



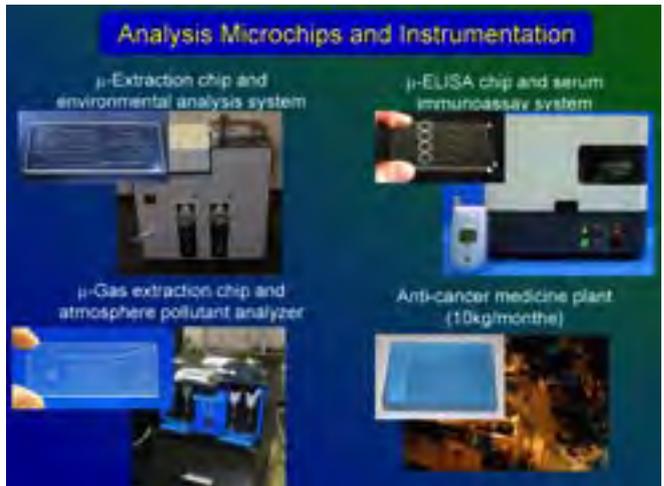
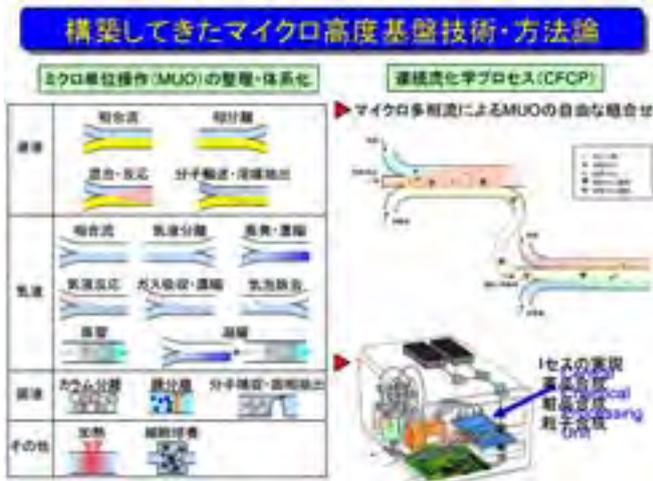
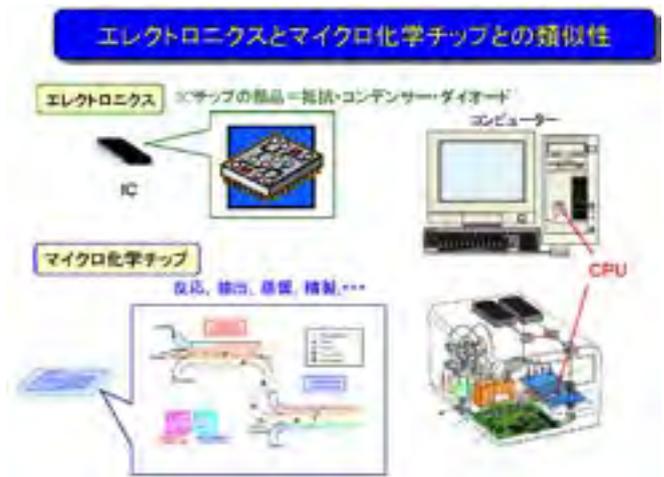
PC Nanolaser
RT CW lasing in ultrasmall nanocavity
Application to refractive index sensing



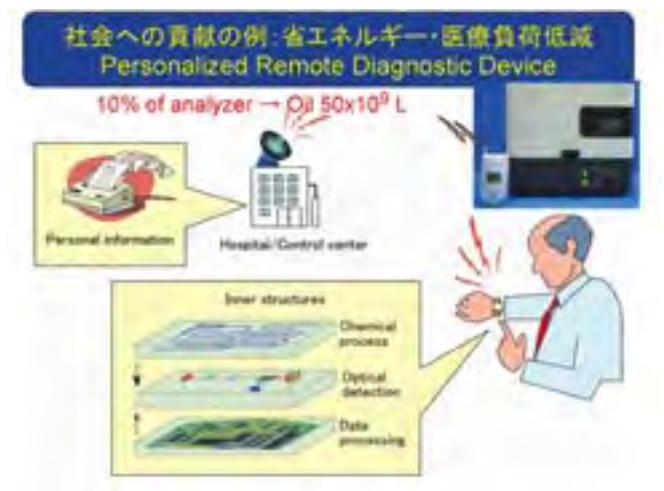
PC Negative refractive optics
Lens and prism effects
Application to compact demultiplexer

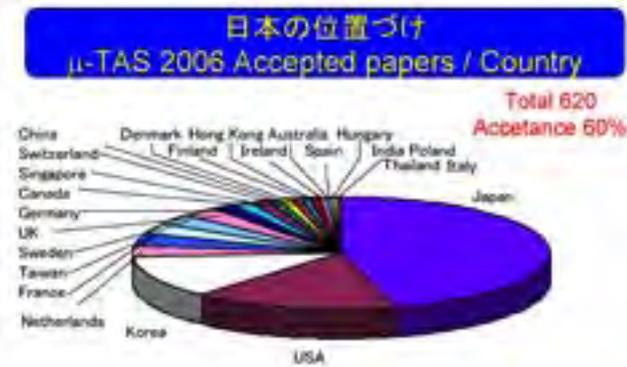
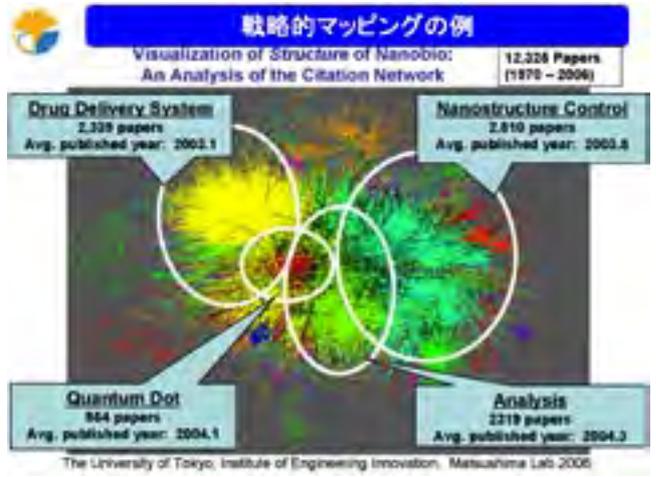
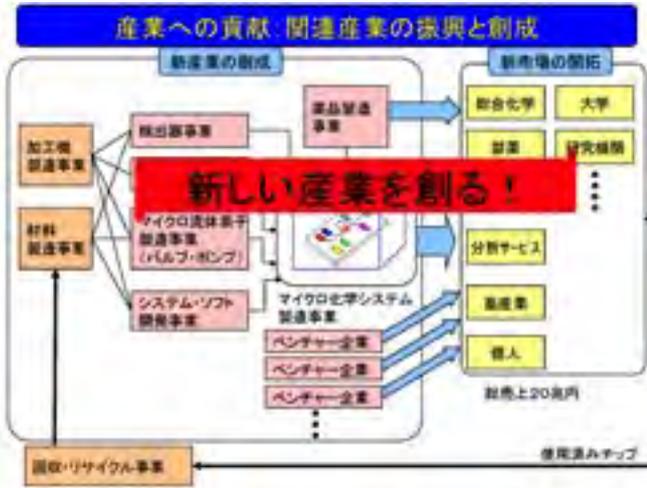


Silicon photonics device
Compact optical wiring by photonic wire waveg.
Devices and circuits are dramatically miniaturized
CMOS compatible design and process desired
to move away from old optical technology



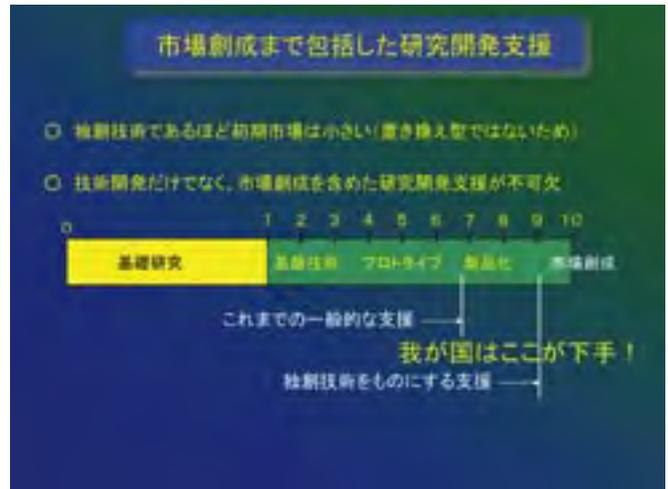
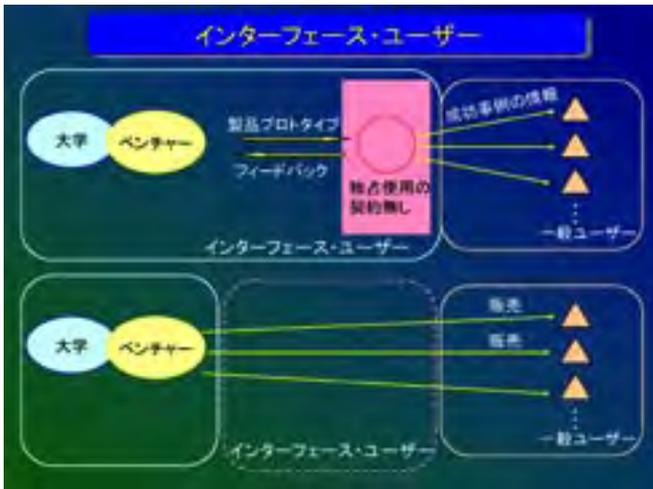
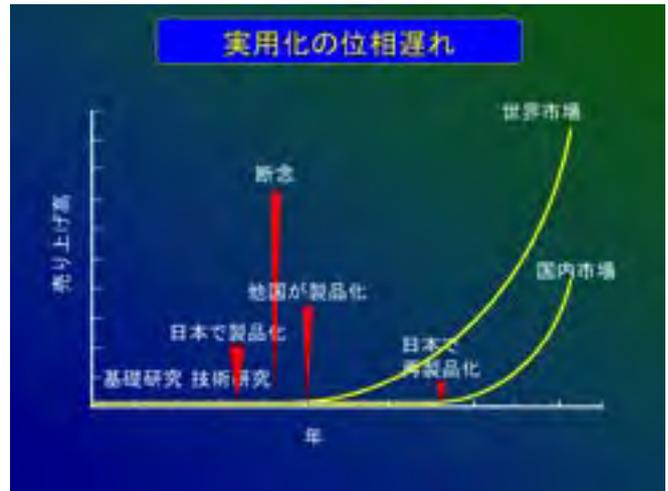
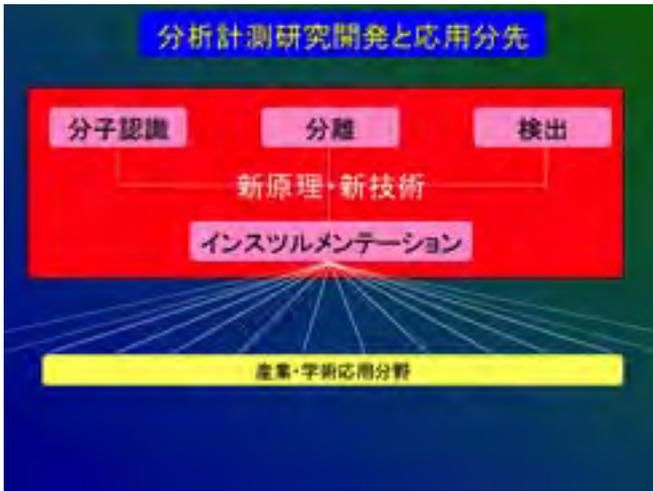
- Why microchips? (Size: 1/10)**
- Small quantity (1/1000)**
 - n to p L \rightarrow compact
 - n to p J/ (g·deg) \rightarrow precise control
 - Rapid processing (1/100)**
 - Two orders faster
 - hr \rightarrow sec, day \rightarrow min
 - Large S/V (10)**
 - Efficient S/V reaction
- 軽薄短小: 新概念・新価値**
- Process integration**
 - 10 procs/cm²
 - Highly functional
 - Parallel operation**
 - High throughput
 - Bulk production





一般論: 1) 分析計測研究の俯瞰的分類
2) なぜ実用に至らないか





- ### 社会的な課題と対応策
- I 新しい技術がなかなか産業化できない現状と課題
 - 1) 大企業支配の産業構造: 10~20億円以下の市場に進出できない
 - 2) ユーザーの気持ちに対応していない
 - 3) 海外依存でかつ閉鎖的保守的な市場特性
 - II 対応策
 - 1) ベンチャー企業の小回りの利く活動
 - 2) ユーザーとのインターフェース事業: 例えばモデル事業
 - 3) 海外評価の利用



ものづくりとリンクした複合計測
及び 最近のアメリカの計測情報技術

メリーランド大
竹内一郎



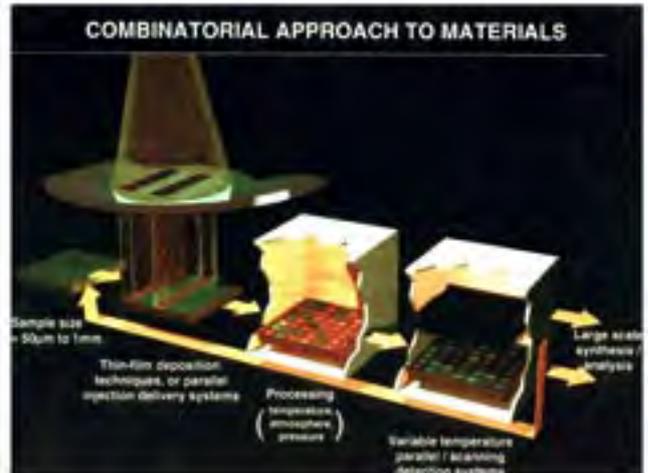
Overview

- 多元複合計測システム
- 測定インフォマティクス
- 最近のアメリカの計測情報技術
- NIST USMSIについて
- Cyber-Enabled Discovery and innovation (NSFの新しいProgram)
- IARPA
- その他



多元複合計測システム
(ものづくりとリンクした複合計測)

- 定義: 各種測定装置を組み合わせて新材料合成、評価のワークフローの迅速化を促すためのシステム
- ロボティクス、インフォマティクス、リモートアクセス、自動化のelement
- ルーチン化したプロセスあるいはハイスループット実験、材料開発において発揮される。
- 主にポリマー、触媒の開発に取り入れられている
- 例: コーティング (Syrryx システム) | BASF 油CSC | FLAMAC



複合計測のチャレンジ
ハイスループット スクリーニング
応用例: FLAMAC(コーティング)



	Technique	Resonance	Throughput (1-1 day)	Accuracy
組成、濃度	GC/MS	Elemental composition, Polymers		Dec 2007
組成、濃度	Ellipsometry	Thickness, composition	200	X
FTIR	FT infrared	Chemical Composition, Polymers	100	X
光学特性	Visible and Near Infrared	Transmittance, Reflectance	400	(A) Nov 2007
電気抵抗	Van Der Waals resistance	Resistivity	400	S
表面エネルギー	Contact angle	Surface Energy	80-1000	S
mechanical特性	Nanoindentation	Hardness, Young modulus, scratch resistance		(A) Dec 2007
X線解析、構造	SAXS diffraction & reflectance	Texture, phase & structure		Em 2007

複合計測のチャレンジ: いかに効率よくデータを連結するか

ものづくりとリンクした複合計測の例:
Nダコタ州立大

ポリマー合成を中心としたコンビトリアル材料研究センター



サンプルの
トランスファーは
マニュアル操作

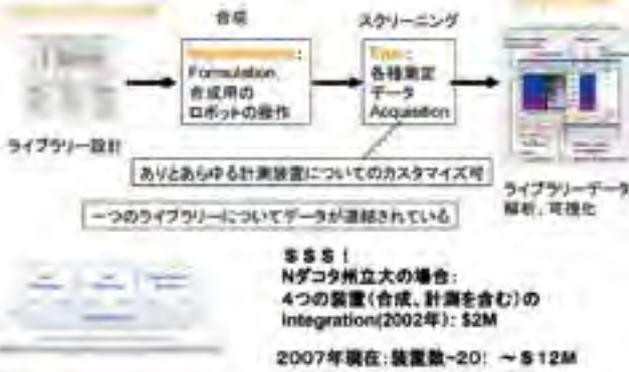


ポリマー合成、formulation
のライブラリー、コーティング
ライブラリー

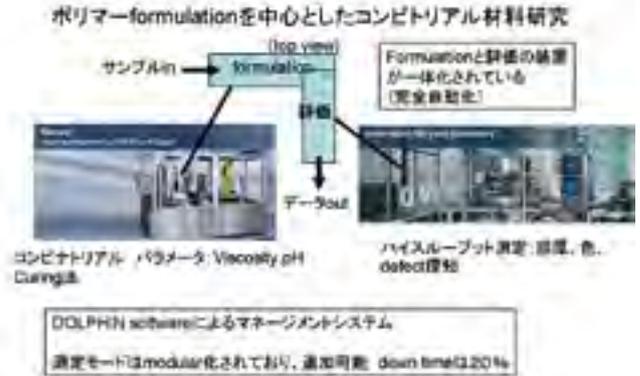
計測、評価:
Molecular weight, FTIR,
Chromatography, コンタクトアングル,
DSC, etc.

データマネージメント、解析、装置自動化はSyrryxのソフトRenaissanceを使用

Symyx Renaissance system (Oracle ベース):
コンビナトリアル材料研究のワークフロー管理用のソフト



ものづくりとリンクした複合計測の例:
BASF/BOSCH (ドイツ)



測定インフォマティクスのサイクル



インフォマティクスactivities
DOW chemicalのR&Dラボの例

コンビナトリアル実験のテーマ: 各種触媒及び有機材料

インフォマティクスサイクルへの対応:
 IT専門の研究者及び各分野ドメインエキスパートからなる
 Task forceを設けてある。



データベースの構築: externalの文献をもとにしたデータベース、
 internalで行われてきた実験をもとにしたデータベース

データベース、企業間でshare?

複合計測と測定インフォマティクス

- チャレンジ:
 ありとあらゆる装置をハイスループットで取りこむ全てのデータを連結する
- データ管理、メタデータの連携性:
 異なる全く違ったデータ源(分光、顕微鏡、CCDカメラ、mass spec)がひとまとめで解
 析できるか?
- ロボティクス、柔軟性:
 HLインテリジェントによるポリマー合成;
- 値段は高いがワークフローコントロールシステムは購入できる(カスタマイズ可)
 ただ大学/Research Labでは一部を除いてこれらは全くつかわれていない
 → MATLAB LABVIEWなどを用いた独自のソフトウェア
- 計測装置メーカーはあまり興味なし
 Communityの統一したeffortが必要
- データマイニングの90%は可視化に限られている

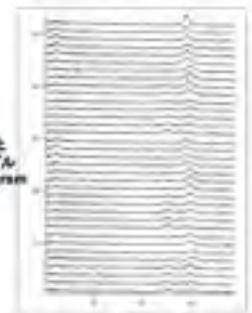


Scanning XRD microdiffraction



Synchrotron microdiffraction

ライブラリー上
 全てのサンプル
 のdiffraction



一つのライブラリーのデータ量はraw dataでテラ bytes以上にも及ぶ

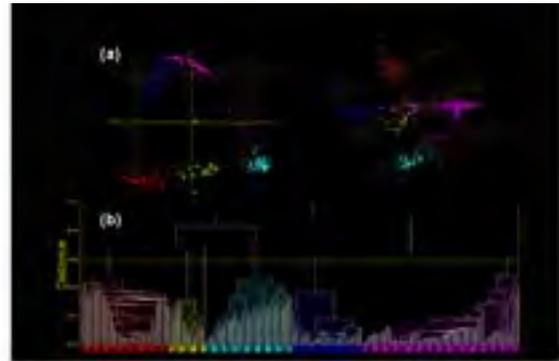


X線データのクラスター解析

全てのサンプルのデータに対して互いの類似を表記する
 MMDS: Metric Multi-dimensional Scaling
 Dendrogramを調節しグルーピングをきめる

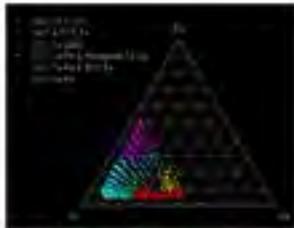


Long, et al., Rev. Sci. Instrum. 78, 072217 (2007)



Software: PolySNAP (Bruker AXS) \$2万ドル

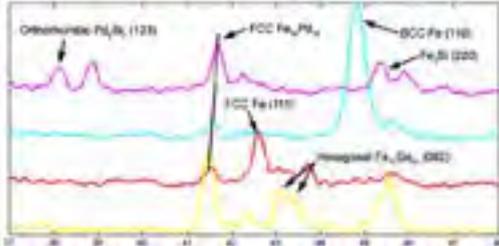
↓
 全ての同じ機能をMATLABで再現: XRDsuite



コンポジションスプレッド法を用いて Fe-Pb-Ga三元相図のマッピング

数百のdiffractogramから5つのグループへreduce

↓
 ICSDのcrystallographic databaseと照らし合わせて構造・相をidentifyする



マテリアルインフォマティクス



NSFの新しいProgram (2006-):
 データマイニング、情報処理を用いた新しいサイエンスの創造

Cyber-Enabled Discovery and Innovation (CDI)

CDI seeks ambitious, transformative, multi-disciplinary research proposals that address the following:

- **From Data to Knowledge:** utilizing numerical/visual and generating new knowledge from a wealth of heterogeneous digital data.
- **Understanding Complexity in Natural, Built, and Social Systems:** gaining fundamental insights on systems comprising multiple interacting elements.
- **Building Virtual Organizations:** enhancing discovery and innovation by bringing people and resources together across institutional, programmatic and cultural boundaries.

\$52M/year for 30-50 awards

計測技術のstate-of-the-art:

Defense-Intelligenceのための各種センシング・センサーアレーなどの技術

DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency)

最近ではSpintronics, metamaterialsなどのテーマに貢献

IARPA (Intelligence Advanced Research Projects Agency)

CIA, FBIなどのAgenciesのためのIntelligence テクノロジースパイのための新カメラ, Communications テクノロジー

(2007年に設立, College Park, MD)



マイクロ波顕微鏡: 複合計測、多目的SPMの開発

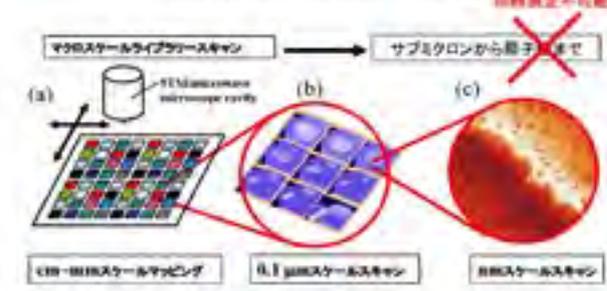


測定モード/材料	測定パラメータ	空間分解能
絶縁体	誘電率	100 nm
金属	抵抗率、インピーダンス、表面抵抗	100 nm
誘導電体	多層形誘電率	1 nm (導体、良導)
FM	Ferromagnetic resonance	100 nm ⁺
超伝導材料	STM-ESR Electron spin resonance	Atomic Resolution

マルチスケール マイクロ波顕微鏡

(メリーランド大・W. M. Keck Lab)

アトミックresolution測定は別のヘッドで

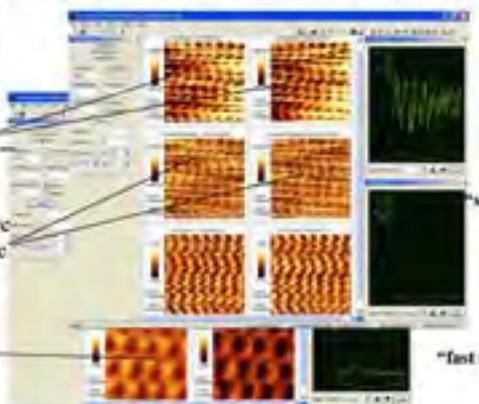


マクロスケールライブイメージング → サブミクロンから原子スケールまで

(a) STM/microwave microscope cavity (b) 0.1 μmスケールイメージング (c) 原子スケールイメージング

一点、一点のメトロロジーモード

Atomic resolution STM/microwave microscopy



STM トポグラフィ

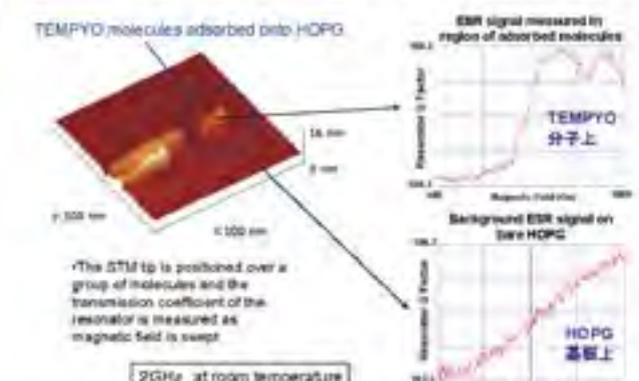
Microwave Impedance (1 GHz)

STM Current Image

slow scan

"fast scan"

Scanning Tunneling Microscopy - Electron Spin Resonance (STM-ESR)



TEMPYO molecules adsorbed onto HOPG

ESR signal measured in region of adsorbed molecules

TEMPYO 分子上

Background ESR signal on bare HOPG

HOPG 基底上

2GHz at room temperature

JGI (Joint Quantum Institute):

(2006年一)

NIST, メリーランド大, NSA (National Security Agency) のコラボレーションでできた新しい研究センター

量子コンピュータなどの応用を目指した、量子コヒーレント現象各種の基礎研究: 超電導系、半導体量子、AMO、イオントラップ系、他

予算: \$5M/yr

Members: メリーランド大 14人
NIST 12人 (ノーベル賞受賞者2人含む)
NSA 3人

いずれはメリーランド大校内に研究所を移す予定 (5~10年後)

すでに成功を収めているJILA (NIST/Colorado大)をモデルにしている

USMS (U.S. Measurement Systems)について

(2005年一)

ブッシュのAmerican Competitive Initiative (ACI) に対応するため NIST の前Director Bill Jeffreyが設立したプログラム

目的: NISTの計測技術について産業界との関連性の調査

各産業界で今(またはこれから)必要とされている計測技術とはなにか?

またそういった測定技術に対するNISTの役割とはなにか?

約500もの項目についてそれぞれレポート

それぞれ項目に対処
ページ1: NISTで進められている研究とその関連性
ページ2: 企業からのAuthentication (認可、証明)

An Assessment of the
NIST's Status Measurement System:
Addressing Measurement History to
Accuracy Issuance

USMS (U.S. Measurement Systems) について



<http://www.nist.gov> (2005年ー)

いくつかのトピックについてワークショップが開かれた
例: プロテオミクス, 医療-imaging, フレキシブルエレクトロニクス。

USMSの役目:

- 1) 各Division, グループにおいて現在行われている研究をjustify
- 2) NIST内部の予算を決めるための情報源

USMSの調査はこれからも、続けられる(2008年ー)
USMS DirectorはDennis SwytからClare Alloccaへ

ACIは今のところNIST, NSFなどの予算の増幅にはほとんど効いていない(2007年現在) - Partisan politicsが原因

TEAM (Transmission Electron Aberration Corrected Microscope)

Department of Energy (\$25M) project
(Lead: Lawrence Berkeley Lab, Oak Ridge National Lab)

目標: 0.5 Å (information limit) for TEM and STEM

Final stage bidding: FEI (Philips), JEOL, Nikon

Contract は FEI へ

Reasons: JEOLとFEIのカルチャーの違い

競争, サービスの面でJEOLは優れているが...



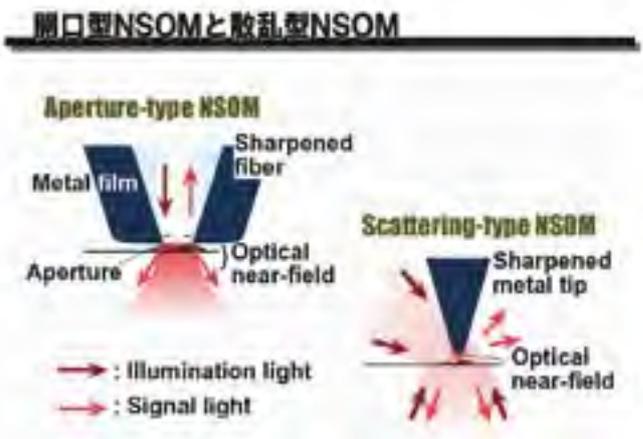
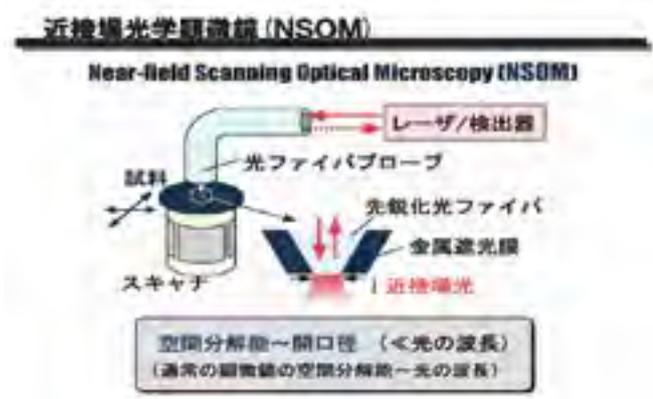
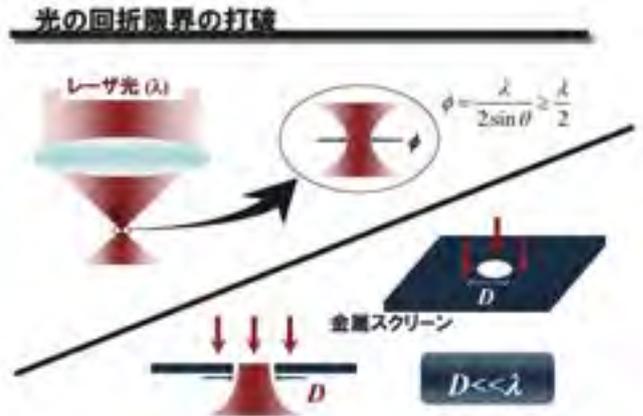
0.5 Å for TEM achieved at FEI factory (2007年秋)

LBL納入(2007年末)

Publicにオープン(2009年10月)

先端産業のニーズに寄与する革新的計測・分析技術
NSOM (近接場光学顕微鏡)

慶應義塾大学 理工学部 電子工学科
 神奈川科学技術アカデミー
 斎木 敏治



NSOMの歴史

1984年 D.W. Pohl, A. Lewis NSOMの誕生

1992~94年 E. Betzig NSOMのアプリケーション

NSOM研究者人口の急激な増加

散乱型NSOMの発明 (S. Kawata) → 現在の研究トレンド

開口型プローブ技術の高度化 (M. Ohtsu, T. Saiki) → スタンドアードプローブの提供 (日本分光により製造・市販化)

日本がNSOMの基礎を変える

NSOM性能の現状

開口型NSOM

20~30nmの空間分解能

リーズナブルな感度(測定時間)

散乱型NSOM

10~20nmの空間分解能

単一CNTのラマン分光

標準型NSOMの産業応用上の問題点

- プローブの個体差によるデータ再現性の問題
プローブの機械的強度の向上、洗浄技術
標準試料を用いたデータ校正
地道な作業 / 長期安定的な資金サポートが必要
- 凹凸構造がもたらす不要なコントラスト
実デバイス評価に支障
塗膜の対応
- 測定にストレスを感じさせない装置開発
簡易なセットアップ、測定領域への迅速なアプローチ

新たな展開に向けて（1）

- 高分解能化
純光学的な分解能の限界
化学的、物理的な近距離相互作用機構の活用
(電場、応力、電荷移動プロセス)
- 高感度化
低量子効率発光源の検出
単一ドット検出
アンテナ構造・プラスモニクスを利用した蛍光増強

新たな展開に向けて（2）

- 波長領域の拡張
赤外分光：振動分光、電子デバイス評価
テラヘルツ分光：塗膜、ライフサイエンス
- 特殊環境動作
低温・超高真空：材料物性評価
流中動作：細胞イメージング、反応系
より簡便な装置開発が必要
- フェムト秒技術との融合
時間・空間分解能、非線形効果、加工

今後の研究・開発の方向性

- 正攻法で課題を克服
- 新しい測定対象・応用領域を探索
- 「正しい顕微鏡」に回執しない応用
プローブが与える振動を積極的に利用
NSOMプローブをセンシングデバイスとして機能
- 発見をヒントに新たな展開(デバイスへ)

長期的視野に立った基礎研究

科学技術シーズを産業につなぐための先端計測
俯瞰ワークショップ

iPS細胞を機軸とした再生医療へ向けた
先端計測技術の開発

平成20年1月14日
国立研究開発戦略センター
はろグループ(ライフサイエンス領域)
石井 賢也 Ph.D.
fujimori@csc.go.jp

ヒトiPS細胞がもたらしたインパクト

- 19年11月20日 ホワイトハウスが歓迎との声明
- 11月22日 バチカン法王庁が歴史的成果との声明
- 11月27日 カリフォルニア再生医療機構が当該研究の公募開始
- 11月29日 米国で細胞リプログラミングに立脚したベンチャー設立の動き(NY Times)
- 12月 MITおよびハーバードが追試、一部の治療効果を実証を報じる複数の論文
- 12月13日 NIHが当該研究のグラント公募開始
- 20年1月米国大統領選における幹細胞研究に対する見解(CNN HP)

自分自身の細胞で難治性疾患を克服する、
真の意味の再生医療開発へ

京大再生研 山中教授*によるヒトiPS細胞の樹立

(JST/CREST) 産学連携



- 一度分化した細胞の若返り(リプログラム)が通常のラボで可能
- ヒトES細胞が抱える倫理的問題を回避
- 再生医療開発における免疫拒絶反応の課題をクリア

Induction of pluripotent stem cells from adult human fibroblasts by defined factors
Takahashi, Y. & Yamanaka, K. Nature 447, 786-789 (2007). doi:10.1038/nature06032

再生医療(細胞移植治療)開発のステップ

理想的な多能性幹細胞であるiPS細胞を臨床へ届けるために

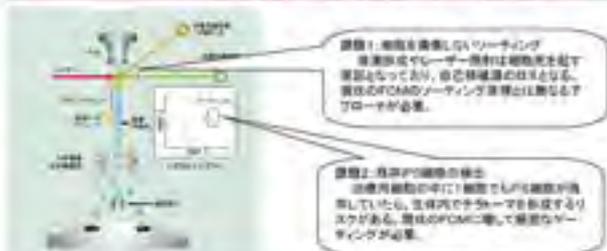
- iPS細胞を生体外で自己複製(増殖)させる
- iPS細胞を生体外で治療用細胞に分化させる
- 治療用細胞を免疫拒絶を受けずに生体内に移植する
- 細胞移植によりテラトーマ(腫瘍)を形成させない
- 治療用細胞を生着させる
- 治療用細胞による生理的悪影響がない
- 移植細胞が機能発現し、永続的な治療効果をもたらす

先端計測技術の進展が必要

iPS細胞を用いる細胞移植治療に向けた先端計測技術開発①
フローサイトメーター(FCM)

テラトーマ形成を回避するため、移植の前に、iPS細胞と治療用細胞を完全分離しておく必要がある

FCMの高性能化:「精密・多視覚ソーティング技術」



上記課題をクリアするFCMが生まれれば、治療用細胞のGMP生産をも強力に支援する

iPS細胞を用いる細胞移植治療に向けた先端計測技術開発②
核磁気共鳴画像法(MRI)

移植細胞が定着したことを確認するには、移植前後並ぶような解像力をもつMRIが必要である

MRIの高性能化:「組織特異的、かつ細胞レベルの画像化技術」

難治性疾患のための種別多数の細胞移植の生着を確認する場合

課題①: 移植細胞を特異的に抽出する造影剤
細胞や血管などの特異的に造影する化合物はあるが、移植を特異的に造影する造影剤はあまり聞かない。

課題②: 細胞レベルの画像化
細胞移植の動物の構成の上から移植細胞を抽出するには、実行を大きく上げる解像度が必要。



上記のMRIは、移植細胞の生着を非侵襲的にモニターでき、臨床試験を促進する

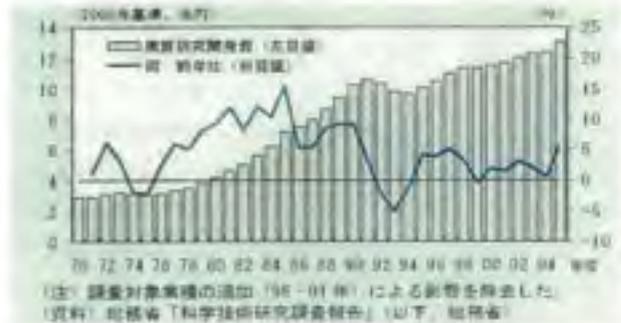
計測・分析支援産業からの問題提起

1. 分析支援産業の現状
2. 先端産業の研究開発現場からの計測・分析ニーズ
3. 先端産業の分析ニーズに対する分析技術・機器開発(例)

関東レリサーチセンター 石田英之

企業の研究開発費の推移

大学・公的研究機関の研究開発費含めると18兆円規模(2006年)

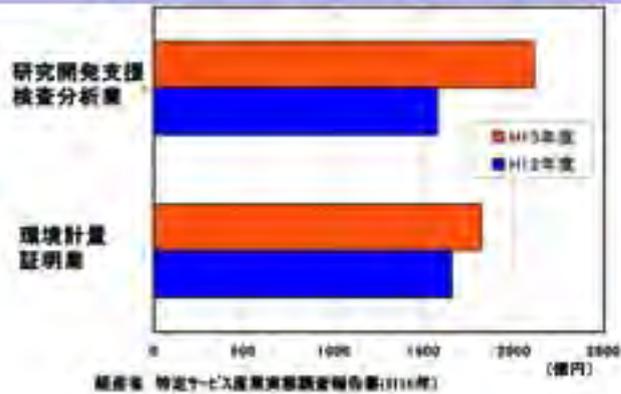


分析のアウトソーシングの現状



民間企業の研究開発費約12兆円の6%が分析関連費用
分析費用:約7,000億円、30%がアウトソーシング

分析支援(受託)産業の売上の推移



分析関連産業の規模

名称	年間売上高	事業者数	出展
分析機器製造業	3,276	11,423	日本分析機器工業会
研究開発支援 分析・検査業	2,112	17,065	特定サービス産業実態調査報告書
環境計量証明業	1,822	17,824	同上
臨床検査受託業	4,130	-	日経市場占有率調査

(日本分析機器工業会 H17年報告)

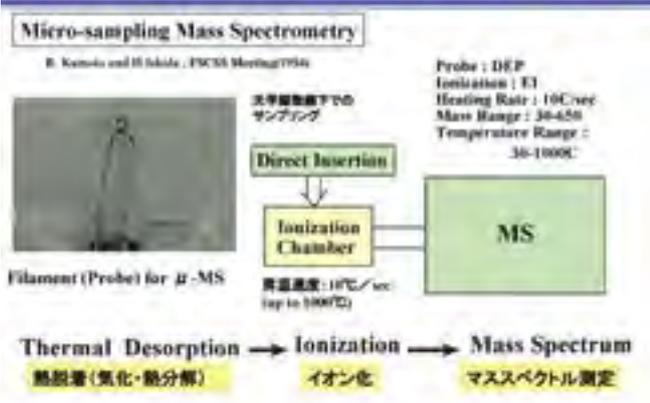
分析産業は周辺の事業を含めると、1兆円超の規模

分析外注(アウトソーシング)の背景

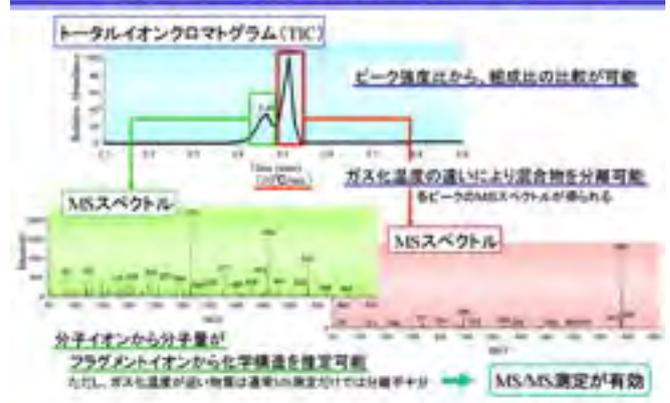
コア業務への資源集中と社外資源の確保・活用



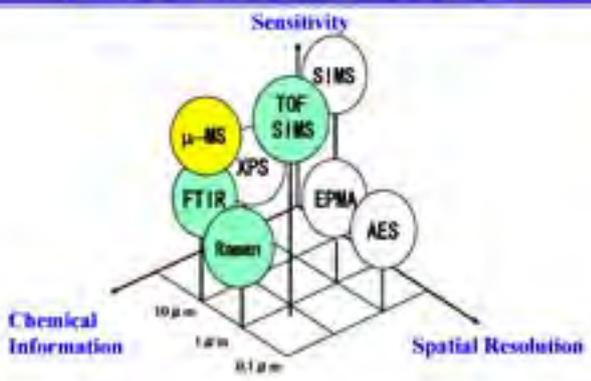
マイクロマス (μ -MS) の分析方法



マイクロMS法により得られる情報



微小部分分析手法の比較



先端産業のニーズに寄与する分析技術・分析機器の開発例

1. 有機物の深さ方向化学構造解析
有機物の深さ方向化学構造解析には不適
(エッチング/スラッシング法) → 精密斜め切削法

2. 薄膜の高精度深さ方向解析
精密斜め切削法 → 前処理技術

3. 有機物の深さ方向化学構造解析
有機物の深さ方向化学構造解析には不適
(エッチング/スラッシング法) → 精密斜め切削法

深さ方向の分析手法

対象深さ(深さ)	化学構造	元素
10mm	?	AES, XPS(エッチング) SIMS(スラッシング)
100mm	?	AES, SIMS, XPS, RBS(非破壊)
1 μ m	ATR(角度変化法) 顕微ラマン(斜め研磨法)	SIMS, AES RBS
10 μ m	顕微ラマン(走査) 顕微赤外(切片作成法)	EPMA(断面), LIMS (Back side SIMS)
100 μ m	顕微赤外(切片作成法) ATR(逐次研磨法)	EPMA(断面)

精密斜め切削法による高精度深さ方向分析

従来の深さ方向分析 = 有機物の深さ方向化学構造解析には不適
(エッチング/スラッシング法)

N. Nagai et al., Appl. Surf. Sci., 121, 101(2001), Anal. Sci., 17, 671(2001)

精密斜め切削法(GSP: Gradient Shaving Preparation)

試料を物理的に切削して傾斜面を作成

各種分析マイクロプローブ(μ -FTIR, μ -XPS, TOF-SIMS等)

傾斜切削

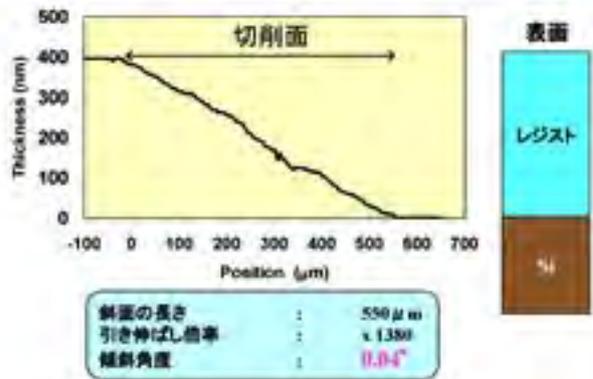
・イオンエッチングのような構造破壊がなく、化学構造情報が得られる
・深い領域までの解析を行うことが可能

“2005年度日本分析化学会 先端分析技術・機器開発賞 授賞”

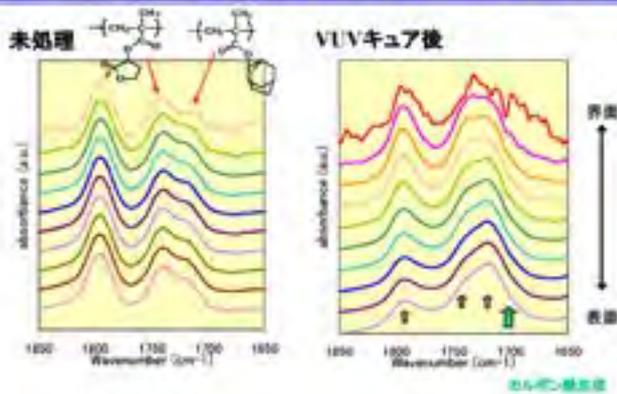
精密斜め切削法によるレジスト薄膜の分析



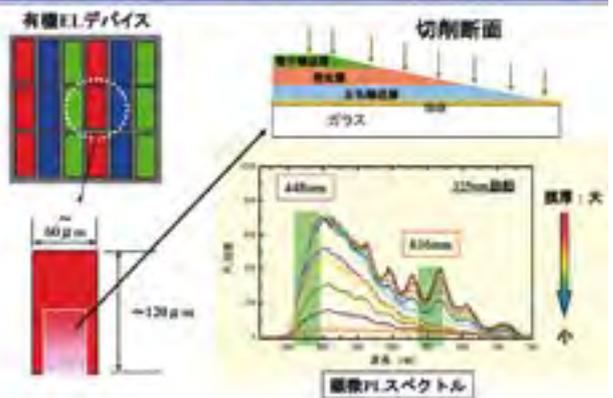
精密斜め切削法で切削したレジスト薄膜



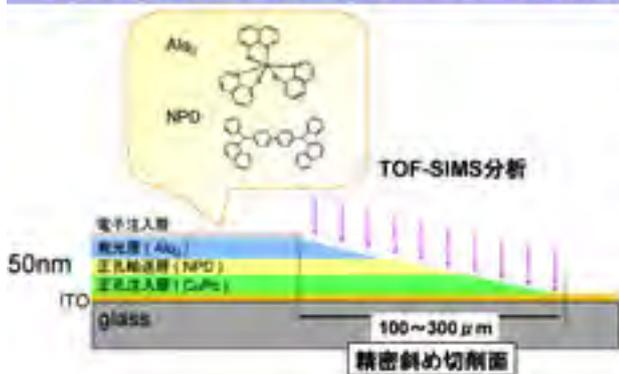
カルボニル吸収領域における構造変化



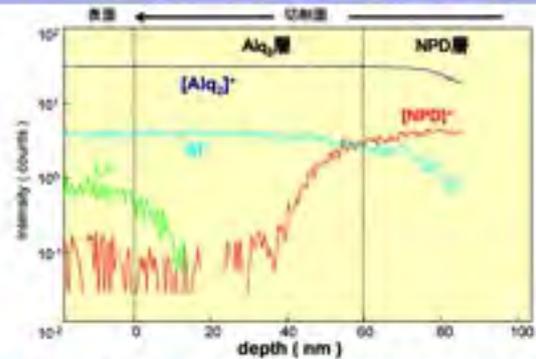
精密斜め切削法の有機ELへの応用



有機ELの層構成の分析(TOF-SIMS)



各成分の深さ方向分布



先端産業のニーズに寄与する分析技術・分析機器の開発例

1. 先端産業のニーズに寄与する分析技術・分析機器の開発例
2. 先端産業のニーズに寄与する分析技術・分析機器の開発例
3. シリコンの微小領域の応力評価
近接場分光装置 → 分析機器開発

歪シリコン トランジスター

歪シリコントランジスタの構造と動作原理を示す図。左側はSEM画像、右側は断面図。ゲート電極、ソース電極、ドレーン電極、シリコン層、シリコン酸化物層、シリコン窒化物層が示されている。シリコン層が湾曲することで、チャンネル領域に歪みが生じ、電子の移動度が向上する。図中のラベルには「Gate」、「SiO₂」、「Si」、「Si₃N₄」、「Gate Electrode」、「Source Electrode」、「Drain Electrode」が含まれる。

微小領域の歪の評価(計測)が重要

近接場ラマン/CL装置の開発

近接場ラマン/CL装置の構成図。レーザー光源（CCFL PM）からファイバ光学系（Optical Fiber, Coupling Fiber）を介して、SEMヘッドに光が導入される。SEMヘッドにはプローブ先端と、ピエゾステージ（Piezo Stage）が搭載されている。システムはPCで制御され、カメラ、レンズ、検出器などが接続されている。開発者として「東リサーチセンター 産総研(大阪大学) フォトンデザイン」と「日立ハイテック/ロジーズ」が記載されている。

近接場ラマン装置開発のポイント

1. 立体角の大きな特殊形状の空洞の近接場プローブを用いる (透過率が2桁向上)
2. 紫外レーザー(364nm)を用いてレーザー光の侵入深さを浅くする(50nm→5nm)・・・空間分解能
3. 光ファイバーを用いず、ラマン散乱光や蛍光を出さない、特殊な材料の近接場プローブを用いる(バックグラウンドの除去)
4. Siの直接遷移/バンドギャップ(364nm, 3.4eV)に近いレーザー光で励起してラマンスペクトルの感度の向上を図る(共鳴ラマン効果で2桁向上)

特願2004-233138(出願済)

従来の装置よりも10⁴倍以上高感度な分析装置が完成

開発ポイント1(プローブ構造の改良)

(a) 近接場光ファイバープローブ
光の透過率 (10⁻⁷)

(b) プローブを円錐状
電子銃
プローブを円錐状に並べ感度の向上 (10倍以上)

(c) プローブをピラミッド型
電子銃
レーザー
Agのコーティングによる感度の向上
空洞のピラミッド型にすると透過率が2桁向上
先端径 100~200nm

参考文献: M. Yoshikawa and M. Marakami, Appl. Spectrosc., 55, 479(2001); M. Yoshikawa et al., J. Appl. Phys., 95, 1486(2004)

Si/SiO₂積層膜(試料)

The SNORM image measured by the bent-type fiber probe with an aperture of 20nm

Si/SiO₂積層膜のSNORM画像と構造図。SNORM画像は500nmのスケールを示し、規則的なパターンが観察される。構造図には「Pitch 1800 nm」、「SiO₂ layer Depth 180 nm」、「Si」が示されている。試料は「VLSI (very-large-scale integration) standards」として用いられている。

戦略ワークショップ

科学技術シーズを産業につなぐための先端計測
－日本の産業力強化に資する先端計測技術の諸課題－
報告書

CRDS－FY2007－WR－18

独立行政法人 科学技術振興機構 研究開発戦略センター
井上グループ

〒102-0084 東京都千代田区二番町3番地

電話 03-5214-7485

ファクス 03-5214-7385

<http://crds.jst.go.jp/>

平成20年3月

許可なく複写・複製することを禁じます。
引用を行う際は、必ず出典を記述願います。

